

12

58<sup>e</sup> jaargang

# NATUUR '90 & TECHNIEK

natuurwetenschappelijk en technisch maandblad



## KRUIT EN KNEEDBOM

NOBELPRIJZEN: GENEESKUNDE/SCHEIKUNDE/ NATUURKUNDE  
DE OORSPRONG VAN DE ELEMENTEN/ IJSTIJDEN

# Cursusaanbod

## **Bedrijfskunde (Productie/Logistiek)**

2 jaar, ca 40 avonden per jaar

## **Bedrijfskunde (Commerciële Techniek)**

2 jaar, ca 40 avonden per jaar

## **Technisch Schrijven**

1 jaar, ca 30 avonden

## **Bedrijfskunde (Flexibel Produktiemanagement)**

2 jaar, ca 40 avonden per jaar

## **Besturingstechnologie (Meet & Regeltechniek)**

2 jaar, ca 40 avonden per jaar

## **Computersimulatie (Dynamische systemen)**

1 jaar, ca 27 avonden

## **Computer Science (Algemeen)**

2 jaar, ca 40 avonden per jaar

## **Computer Science (C-Unix/Syst.progr.-Prolog/Expert)**

1 jaar, ca 37 avonden

## **Computernetwerken**

1 jaar, ca 40 avonden

## **Kennis Ingenieur (Knowledge Engineering)**

1 jaar, ca 40 avonden

## **Milieuhygiëne (Basis)**

1 jaar, ca 40 avonden

## **Relationele Databases (analyse/ontwerp/bouw/gebruik)**

1 jaar, ca 30 avonden

## **Milieuhygiëne (Specialisaties: Bodem-Lucht-Water)**

elke specialisatie 1 jaar, ca 30 avonden

## **Milieu Geluid (Beheersing en Hinderbestrijding)**

1 jaar, ca 40 avonden

## **Milieu Afvalproblematiek**

1 jaar, ca 40 avonden

## **Warmtekrachtkoppeling**

1 jaar, ca 32 avonden

## **Vermogens Electronica (Aandrijftechniek)**

1 jaar, ca 30 avonden

## **Telematica voor Managers (in samenwerking met PTT-Telecom)**

4 maandagen (middag-avond)

TOELATING: HTS, TU of gelijkwaardig.  
Voor inlichtingen: PHTO-A tel. 020-444 225  
(ma-di-do: 13.00-21.00 uur,  
wo-vr: 09.00-15.00 uur)

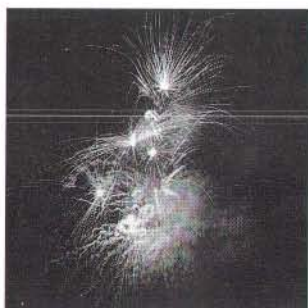
**INFORMATIE AVOND:**  
**do 13 juni 1991**  
**19.00-21.00 uur**  
(vraag eerst informatie)



# NATUUR '90 & TECHNIEK

Losse nummers:  
f 10,95 of 215 F.

**natuurwetenschappelijk en technisch maandblad**



## Bij de omslag

**Bij een groot feest hoort een groot vuurwerk, met veel kleuren, knallen en speciale effecten. Gerard Stout beschrijft vanaf pag. 848 de chemische reacties in ontplofend buskruit, die zorgen voor dit prachtige schouwspel. Dergelijke reacties treden in vrijwel elk explosief op, of men daarmee nu bewondering wil oogsten of dood en verderf wil zaaien.**

(Foto: Dikken en Hulsinga/JNS Pyrotechniek BV, Leeuwarden)

Hoofdredacteur: Th.J.M. Martens.

Adj. hoofdredacteur: Dr G.M.N. Verschuuren.

Redactie: Drs G.F.M. Hendrickx, Drs T.J. Kortbeek,  
Drs E.J. Vermeulen.

Redactiesecretariaat: R.A. Bodden-Welsch, Drs L.P.J. Slangen.

Onderwijscontacten: W.H.P. Geerits, tel.: 0(0-31)4759-1305.

Redactiemedewerkers: Drs J. Bouma, Drs G.P.Th. Kloeg,  
A. de Kool, Prof dr H. Lauwerier, Drs J.C.J. Masschelein, Ir S. Rozen-  
daal, N.I.M. van Wetten, Dr J. Willems.

Wetenschappelijke correspondenten: Ir. J.D. van der Baan, Dr. P.  
Bentvelzen, Dr W. Bijleveld, Dr E. Dekker, Drs C. Floor, Dr L.A.M.  
van der Heijden, Ir F. Van Hulle, Dr F.P. Israël, Drs J.A. Jasperse,  
Dr D. De Keukeleire, Dr F.W. van Leeuwen, Ir T. Luyendijk, Dr P.  
Mombaerts, Dr C.M.E. Otten, Ir A.K.S. Polderman, Dr J.F.M. Post,  
R.J. Querido, Dr A.F.J. van Raan, Dr A.R. Ritsema, Dr M. Sluysen,  
Dr J.H. Stel, J.A.B. Verduijn, Prof dr J.T.F. Zimmerman.

Redactie Adviesraad: Prof dr W.J. van Doorenmaalen, Prof dr W.  
Fiers, Prof dr H. van der Laan, Prof dr ir A. Rörsch, Prof dr R.T. Van de  
Walle, Prof dr F. Van Noten.

De Redactie Adviesraad heeft de taak de redactie van *Natuur &  
Techniek* in algemene zin te adviseren en draagt geen verantwoor-  
delijkheid voor afzonderlijke artikelen.

Vormgeving: H. Beurskens, J. Pohlen, M. Verreijt.

Druk: VALKENBURG OFFSET BV, Echt (L.).

Redactie en administratie zijn te bereiken op:

Voor Nederland: Postbus 415, 6200 AK Maastricht. Voor België:  
Boechtstraat 15, 1860-Meuse/Brussel. Tel.: 0(0-31)43 254044 (op  
werkdagen tot 16.30 uur). Fax: 0(0-31)43 216124.

Voor nieuwe abonnementen: 0(0-31)43 254044  
(tot 20.30 uur, óók in het weekend).

Artikelen met nevenstaand vignet resulteren uit het EURO-artikelen  
project, waarin NATUUR & TECHNIEK samenwerkt met ENDEAVOUR  
(GB), LA RECHERCHE (F), BILD DER WISSENSCHAFT (D), SCIENZA E  
TECNICA (I), PERISCOPIO TIS EPISTIMIS (GR) en MUNDO CIENTIFI-  
CO (E), met de steun van de Commissie van de EG.

Gehele of gedeeltelijke overname van artikelen en illustraties in deze uitgave  
(ook voor publicatie in het buitenland) mag uitsluitend geschieden met schriftelijke toestemming van de uitgever.

Een uitgave van

ISSN 0028-1093

**EURO**  
ARTIKEL

**notu vak**



**Centrale uitgeverij en adviesbureau b.v.**

# INHOUD

AUTEURS XII

HOOFDARTIKEL/Nobelprijzen 823

**ONDERDRUKTE AFWEER** 824

Nobelprijs geneeskunde 1990

**F.H.J. Claas**

Het afweerapparaat dat ons lichaam beschermt tegen virussen en bacteriën, blijkt ook bijzonder effectief tegen getransplanteerde weefsels en organen. Dat is niet verwonderlijk; een hart of nier van iemand anders is voor ons immuunsysteem evengoed een indringer. Voor veel mensen die lijden aan ernstige ziekten of verwondingen biedt een donororgaan echter de enige kans op herstel. Dankzij de onderzoeksinspanningen van Joseph Murray en Don Thomas, beschikken we nu over middelen die de natuurlijke afweer kunnen onderdrukken als nieren of beenmerg van eigenaar moeten wisselen.



**ONTBINDEN IN FACTOREN** 832

Nobelprijs scheikunde 1990

**B.L. Feringa en R.M. Kellogg**

Dit jaar is de Nobelprijs voor de scheikunde toegekend aan Elias J. Corey. Corey werd onlangs nog door collega's bestempeld als de meest produktieve organisch-chemicus ter wereld. De Nobelprijs kreeg hij met name voor zijn werk aan de retrosynthese. Met dit systeem kan een scheikundige de meest efficiënte manier vinden om een ingewikkeld molecuul te maken uit simpele bouwstenen. Dit systeem is dermate logisch, dat het ook toepasbaar bleek in computerprogramma's. Organisch-chemici kunnen nu met behulp van de computer het meest geschikte recept voor het gewenste molecuul vinden.

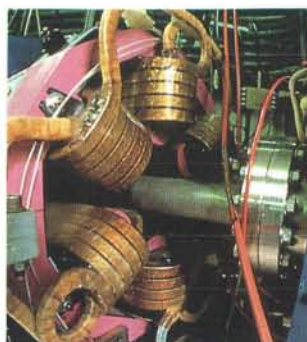


**VERRASSENDE VERSTROOING** 840

Nobelprijs natuurkunde 1990

**J.W. van Holten**

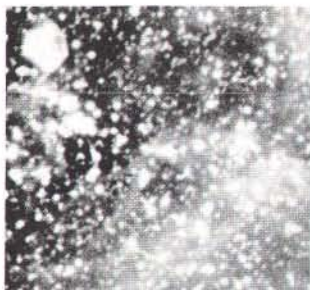
De Nobelprijs natuurkunde is dit jaar toegekend aan de Amerikanen Jerome I. Friedman en Henry W. Kendall en aan de uit Canada afkomstige Richard E. Taylor. De drie heren krijgen de prijs voor experimenten die zij in 1967 en 1968 op het elektronenversnellerlaboratorium SLAC in Stanford hebben uitgevoerd. Zij bestudeerden er botsingen tussen elektronen en kerndeeltjes om zo meer te weten te komen over de samenstelling van kerndeeltjes. Met hun proeven bevestigden ze het bestaan van quarks, de bouwstenen van elementaire deeltjes, die al wel voorspeld, maar nog nooit waargenomen waren.





# NATUUR '90 & TECHNIEK

december/ 58<sup>e</sup> jaargang/1990



## KIJK OP WETENSCHAP

### De oorsprong van de elementen

Tony Cox

Door de oerknal ontstond een heelal met de eenvoudigste elementen: waterstof en helium. De kernen van deze lichte atomen kunnen samensmelten, waardoor zwaardere atomen worden gevormd. Die zwaardere elementen, waaruit het grootste deel van de aarde en wijzelf bestaan, werden gemaakt tijdens de geboorte, het leven en de dood van enkele generaties sterren.



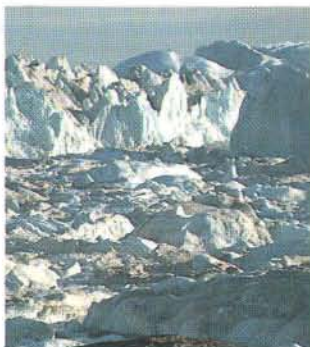
## KRUIT EN KNEEDBOM

848

Explosiechemie

Gerard Stout

Eén deel zwavel, twee delen houtskool en zes delen salpeter. Dat was al in de dertiende eeuw het recept voor buskruit. Weinig chemische reacties hebben de loop van de geschiedenis zo sterk beïnvloed als de explosie van buskruit. In de loop der eeuwen is het gebruik van explosieven sterk toegenomen. Buskruit is verdrongen door andere springstoffen, zoals dynamiet en kneedbommen. Telkens ligt een chemische reactie ten grondslag aan de knal en de energie-explosie.



## IJSTIJDEN

860

Soms rilt de aarde even

A. Brouwer

De twee grote landschappen, op Groenland en op Antarctica, zijn een vertrouwd beeld op onze aarde. Toch is de aarde doorgaans een planeet zonder ijs, met een veel hogere zeespiegel dan nu en met minder uitgesproken klimaatzones tussen evenaar en polen. Een tijdvak met ijskappen duurt enige miljoenen jaren en wisselt in de geschiedenis van de aarde af met veel langere perioden zonder ijs. Gedurende de laatste miljard jaar heeft de aarde zeker vier maal zo'n ijsstijdvak doorgemaakt. Wat is de oorzaak van de wisselende hoeveelheid ijs?

## ANALYSE & KATALYSE

874

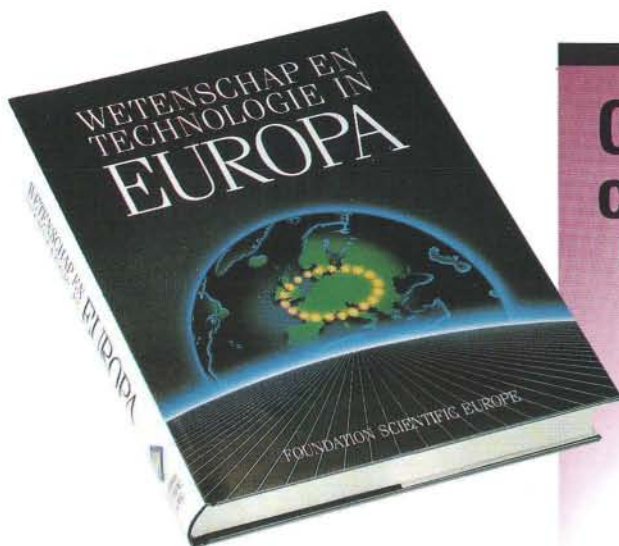
Alvin Weinberg: "Kernenergie komt terug"/De opmerkelijke geschiedenis van ZOAB

## SIMULATICA/Chaos in de groei

886

## ACTUEEL/INHOUD 1990/PRIJSVRAAG

890



## Op reis door een creatief continent

Een fascinerende blik  
in de wereld van  
vooraanstaande  
wetenschappers  
en technologen  
in het Europa  
van morgen

**E**uropa, de bakermat van de moderne wetenschap, staat aan de vooravond van een nieuw wetenschappelijk tijdperk. De continue stroom van ideeën, uitvindingen en doorbraken zal Europa in de 90-er jaren wederom doen vooruitlopen op het gebied van revolutionaire research in wetenschap en technologie. Creativiteit en innovatie zullen geen grenzen meer kennen in het Europa van morgen, een continent dat thans reeds meer laboratoria telt dan kastelen, paleizen en kunstmusea.

U kunt deze fascinerende ontwikkelingen zelf meeleven in het schitterende boek WETENSCHAP EN TECHNOLOGIE IN EUROPA.

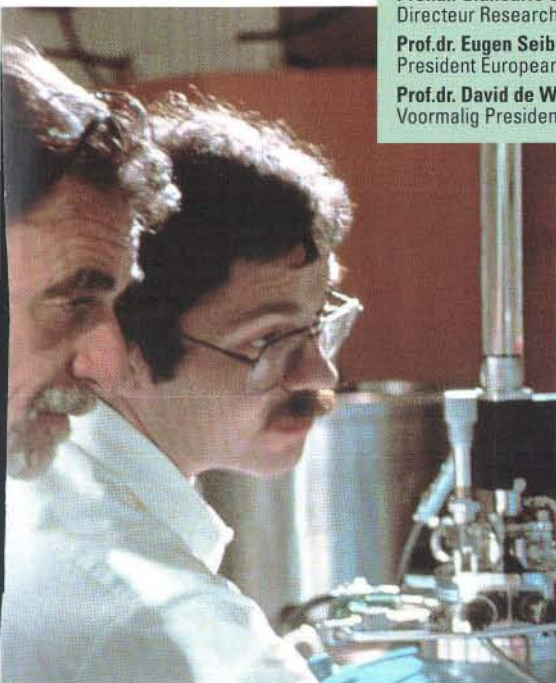
In meer dan 512 pagina's geeft dit boek U een compleet overzicht van de wetenschappelijke en technologische kennis op een creatief continent. Op een groot formaat van 24 x 30 cm, met bijna 1500(!) briljante kleurafbeeldingen.



Belangrijke ontdekkingen bij hersenonderzoek (uiterst links) door Zweedse geleerden dragen bij tot grote vooruitgang op medisch en psychologisch gebied. Duitse sterrenkundigen dringen door tot nieuwe sterrenstelsels met 's werelds grootste draaibare radiotelescoop vlakbij Bonn (links). Daarmee wordt een lange historische ontdekkingsreis naar de oorsprong van het heelal, die de oude Grieken al intrigeerde, door Europese wetenschappers gecontinueerd.



Wij staren ons soms blind op Japan en de Verenigde Staten en hebben te weinig oog voor ons eigen continent. Toen Alex Müller en Georg Bednorz, twee Europese onderzoekers in 1986 in een laboratorium in Zwitserland (foto hieronder) de opzienbarende ontdekking deden dat keramisch materiaal bij relatief hoge temperatuur supergeleidend werd, waren Amerikaanse journalisten de eersten die over deze ontdekking publiceerden. Hun Europese collega's werden pas later door die publikaties op het spoor van de Zwitsers gezet...



## Acht prominenten uit verschillende landen zijn de oprichters van de FOUNDATION SCIENTIFIC EUROPE;

**Mr. Andries A.M. van Agt**, Washington  
Ambassadeur van de EEG in de Verenigde Staten  
Voormalig Minister-President van Nederland

**Sir Walter Bodmer**, Londen  
President van de British Association for the Advancement of Science  
Research Director, Imperial Cancer Research Fund Laboratories

**Prof.dr. Hubert Curien**, Parijs  
Minister van Wetenschap en Technologie in Frankrijk

**Dr. Johan Kremers**, Maastricht  
(Oud-)Commissaris van H.M. de Koningin in Limburg  
Oud-Voorzitter van de Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid

**Mr. Christian Lenzer**, Bonn  
Voorzitter, Commissie voor Wetenschap en Technologie  
Raad van Europa, Parlementaire Assemblée

**Prof.dr. Giancarlo Schileo**, Rome  
Directeur Research en Ontwikkeling ENEA, Italië

**Prof.dr. Eugen Seibold**, Freiburg  
President European Science Foundation, Strasbourg

**Prof.dr. David de Wied**, Utrecht  
Voormalig President Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen

Basisonderzoek en industriële technologie komen samen in een Belgische studie naar een betere microchip (linksonder) en in Engelse vacuumsystemen (rechtsonder) voor oppervlakte-onderzoek van nieuwe materialen.



WETENSCHAP EN TECHNOLOGIE IN EUROPA verschijnt onder auspiciën van de FOUNDATION SCIENTIFIC EUROPE. Het is het eerste Europa boek over ons wetenschappelijk en technisch kunnen. Jarenlang werd eraan gewerkt door een internationale groep van meer dan tachtig vooraanstaande wetenschappers,

industriëlen en politici uit de twintig landen van de Raad van Europa, onder eindredactie van de bekende Engelse wetenschapsjournalist Nigel Calder. Het project stond onder leiding van Theo Martens, die met een bekwame staf van medewerkers bij Natuur en Techniek de illustratierecherche verzorgde.

# Ontdek de onstuitbare kracht van wetenschap en technologie in Europa





In een Grieks laboratorium (uiterst links) is men op zoek naar nieuwe producten uit oliïfolie. Dit werk is een onderdeel van een groot onderzoekproject van de EG. Een goed voorbeeld van multinationale samenwerking op wetenschappelijk gebied; zo belangrijk voor de toekomst van heel Europa.

Philips in Eindhoven (links) speelt een leidende rol in de ontwikkeling van standaarden voor een Integrated Services Digital Network (ISDN), dat de basis zal vormen voor een Europees netwerk van telecommunicatiesystemen in de nabije toekomst.

## HET EUROPABOEK

Is thans verschenen!  
Dit standaardwerk – 508 pagina's met 1482(!) afbeeldingen, geheel in vierkleurendruk is nu verkrijgbaar voor de introductieprijs van fl 125,- of 2450 F (excl. verzendkosten). Evt. betaalbaar in 2 termijnen. Een welkom geschenk voor de a.s. Feestdagen!

## In het voetspoor van Galileo

Wetenschap en technologie zijn op ons continent in beweging, in een tempo dat veel hoger ligt, dan menigene zich realiseert. WETENSCHAP EN TECHNOLOGIE IN EUROPA stelt U dan ook in staat kennis te nemen van de dynamische ontwikkelingen en ontdekkingen in het Europa van de 90-jaren. WETENSCHAP EN TECHNOLOGIE IN EUROPA zorgt ervoor dat U geen enkele van deze ontwikkelingen hoeft te missen:

Zweeftreinen, ontworpen voor de 21ste eeuw, bereiken reeds snelheden tot 400 km/uur in Duitsland. De nieuwe Large Electron-Positron-Collider (LEP) van de CERN in Genève is al bijna in staat het allereerste moment van het ontstaan van ons Universum na te bootsen. Een gezamenlijk initiatief van Zwitserse en Nederlandse wetenschappers zal binnenkort leiden tot de ontwikkeling van een wegwerp-sonde, die in staat is het menselijk lichaam inwendig nauwkeurig te onderzoeken.

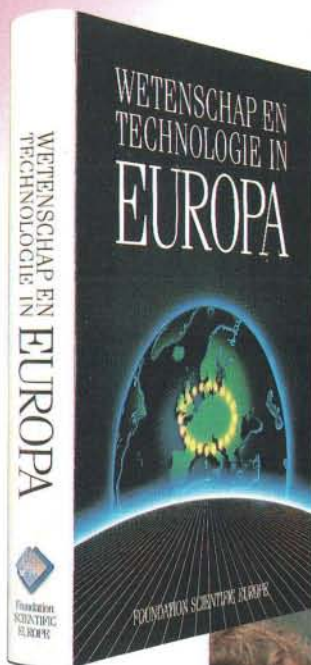


De 4-GHz-antenne, waarmee signalen van de Franse Telecom-satellieten naar vrijwel de halve aardbol kunnen worden uitgezonden.



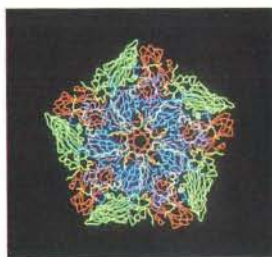


# Ontdek zelf hoe Europa vooruitloopt in wetenschap en technologie



## Samen denken

Of uw nieuwsgierigheid nu uitgaat naar 'het zwarte gat' in de kosmos of naar auto's die te intelligent zijn om tegen elkaar te botsen, U zult getuige kunnen zijn van de verbazingwekkende vooruitgang die Europa's meest vooraanstaande wetenschapsmensen op allerlei terreinen hebben geboekt. Zowel op het gebied van robotica, erfelijkheidsleer als de exploratie van de ruimte; alsmede aan de hand van talloze voorbeelden van vaak gezamenlijk onderzoek uit maar liefst twintig Europese landen. U zult kennis kunnen nemen van de bijdragen van Nobelprijswinnaars. En van meer dan tachtig vooraanstaande Europese wetenschappers, mannen en vrouwen, die grensoverschrijdend werk verrichten.



Onderzoek in Groot-Brittannië aan het mond- en klauwzeer-virus (links) leidt ons dichterbij de ontwikkeling van een nieuw vaccin.

Spanse, Britse en Franse microbiologen (rechts) werken nauw samen in het biotechnologie-programma van de EG.

De bundeling van hun kennis en ervaringen heeft geleid tot een uitermate boeiende expertise over een breed scala van onderwerpen, van prehistorie tot supercomputers en biotechnologie in industrie en landbouw.

Ontdek hoe Europese wetenschapsmensen en ingenieurs het voortouw hebben genomen in de hoge-energie fysica, de sterrenkunde en de vliegtuigbouw. Lees een Italiaanse bijdrage over de ontdekking van de elementaire deeltjes Z en W, die de sleutel vormen tot nog meer ontdekkingen. En volg de Zweedse profeet Bert Bolin bij zijn inspanningen die hebben geleid tot de voorspelling van het broeikaseffect. Ontdek ook hoe de Engelse ontwerper van de transputer tot zijn uitvinding kwam.



# Bestel nu dit fascinerende boek en bespaar fl 50,- of 1000 F

**E**en unieke aanbieding... voor een speciale introductieprijs! Maak nu gebruik van de gelegenheid een exemplaar van **WETENSCHAP EN TECHNOLOGIE IN EUROPA** te ontvangen met een aanzienlijke introductiekorting. U wordt daarmee de trotse bezitter van het eerste standaardwerk over Europa's technisch en wetenschappelijk kunnen. Nooit eerder gaf een boek een zo indrukwekkend technologisch overzicht, nooit eerder bracht een boek zoveel wetenschappelijk talent bijeen. Uw kennis krijgt met dit boek een geheel nieuwe dimensie. Gebruik de bij dit nummer ingesloten bestelkaart\* en U ontvangt **WETENSCHAP EN TECHNOLOGIE IN EUROPA** tegen de speciale introductieprijs van fl 125,- of 2450 F. U bespaart daarmee maar liefst fl 50,- of 1000 F op de normale prijs van fl 175,- of 3450 F. (geldig na 1 April 1991).

\* Uw betaling kan eventueel in twee termijnen geschieden. Na ontvangst van Uw bestelling wordt U het boek binnen 8 dagen in een stevige cartonnen verzenddoos toegezonden, tegelijk met een tweetal giro-overschrijvingsformulieren voor betaling – eventueel van de helft – binnen 30 en 60 dagen. Voor verzendkosten (het boek weegt bijna 3 kg.!) wordt fl 8,50 of 165 F extra in rekening gebracht.



De Spider, een kruising tussen een duikpak en een éénpersoons onderzeeboot, is een voorbeeld van Europese onderwatertechnologie die wereldwijd wordt toegepast.



De grote Noorse handelsvloot maakt op uitgebreide schaal gebruik van het satellietstelsel van Inmarsat. Daarmee beschikt Europa over een uitstekend navigatiesysteem voor de scheepvaart. Denemarken, Finland, IJsland, Noorwegen en Zweden beheren het samen.

Wij weten allen dat ons land de toon aangeeft op het gebied van de agrarische wetenschap. Maar dat een belangrijke ontwikkeling van efficiënte brandstofcellen, die wel eens van cruciaal belang kan zijn voor de Europese energievoorziening, uit Oostenrijk komt, is volslagen onbekend. En dat geldt al evenzeer voor de leidende Engelse rol op het gebied van moleculaire biologie, de vergaande ontwikkeling van supergeleiders in



Zwitserland, de preventiemaatregelen tegen aardbevingen in Griekenland en de Zweedse vindingen op het gebied van industriële robots. Door de lezers in vele landen mee te nemen, op reis langs een groot aantal uitstekende voorbeelden van Europees onderzoek, hopen de makers van **WETENSCHAP EN TECHNOLOGIE IN EUROPA** een bijdrage te kunnen leveren aan Europa's zelfbewustzijn van haar eigen technisch en wetenschappelijk kunnen.

Een microchip-fabriek in Italië, met Frans kapitaal neergezet en samenwerkend met Duitse en Nederlandse partners in het JESSI-project. De samenwerking in de hightech-industrie in het kader van EUREKA, geeft aan dat een wetenschappelijk verenigd Europa geen utopie meer is, maar werkelijkheid.



# Briljante geleerden denken Europees

**Wat maakt Europa in de 90-er jaren tot het potentieel sterkste continent?  
Lees het zelf in WETENSCHAP EN TECHNOLOGIE IN EUROPA!  
Nog nooit bracht één boek zoveel informatie en talent bijeen.**

## De auteurs van het eerste Europaboek

### INTRODUKTIE

*Prof. David de Wied, Nederland  
Prof. Eugen Seibold, Duitsland*

### EUROPA IN BEWEGING

*Dr. Umberto Agnelli, Italië  
Jean Pierson, Frankrijk  
Prof. Hartwig Steusloff en  
Dr. Dirk Heger, Duitsland  
Prof. Bernd Hoefflinger, Duitsland  
Maurizio Cavagnaro, Italië  
Arne Sagen, Noorwegen  
Jean-Louis Michel, Frankrijk  
José Manuel Poudereux, Spanje  
Roger Chevalier, Frankrijk  
Prof. Reimar Lüst, Duitsland*

### DE HANDEN INEEN

*Christian Lenzer, Duitsland  
Prof. Christopher Freeman, Groot-Brittannië  
Prof. Hubert Curien, Frankrijk  
Filippo Maria Pandolfi, E.E.G.  
Prof. Antonio La Pergola, Italië  
Dr. H.L. Beckers, Nederland  
Dr. Michael Posner, Groot-Brittannië  
Margaret King, Groot-Brittannië*

### UIT EEN VER VERLEDEN

*Prof. Knut Heier, Noorwegen  
Prof. Asger Berthelsen, Denemarken  
A.M. Celâl Sengör, Turkije  
Prof. Stephan Mueller, Zwitserland  
Prof. Kenneth J. Hsü, Zwitserland  
Prof. Corrie Bakels, Nederland  
Prof. Jens Lüning, Duitsland  
Prof. Borislav Jovanović, Joegoslavië  
Prof. Pierre-Roland Giot, Frankrijk  
Prof. Hermann Flohn, Duitsland*

### OOG VOOR ONZE PLENEET

*Prof. Ernst U. von Weizsäcker, Duitsland  
Prof. Bert Bolin, Zweden*

*Prof. Paul Crutzen, Nederland  
Dr. Lennart Bengtsson, Zweden  
Dr. Georges Fraysse, Frankrijk  
Prof. Cornelis T. de Wit, Nederland  
Dr. Bernhard Prinz, Duitsland  
Prof. Gotthilf Hempel, Duitsland  
John Shokos, Griekenland*

### SPEUREN NAAR ENERGIE

*Prof. Umberto Colombo, Italië  
Don Lennard, Groot-Brittannië  
Dr. Georges Vendryes, Frankrijk*



*Dr. Gerhard Zankl en  
Prof. Klaus Pinkau, Duitsland  
Dr. Niels E. Busch, Denemarken  
Jens Tómasson, IJsland  
Prof. Karl Kordes, Oostenrijk  
Prof. Sir Nevill Mott, Groot-Brittannië*

### GEAVANCEERDE SYSTEMEN

*Dr. Wisse Dekker, Nederland  
Prof. Francesco Carassa, Italië  
Gijs Bouwhuis, Nederland  
René Steichen, Luxemburg  
Iann Barron, Groot-Brittannië  
Michel Carpentier, E.E.G.*

*Prof. Roger J. Van Overstraeten, België  
Prof. Clifford B. Jones, Groot-Brittannië  
Prof. Teuvo Kohonen, Finland  
Prof. Luigi A. Lugato, Italië en  
Prof. S. Desmond Smith, Groot-Brittannië  
Eric Hardegård, Zweden  
Jean-Loup Rouyer, Frankrijk*

### IN NAVOLGING VAN PASTEUR

*Sir Arnold Burgen, Groot-Brittannië  
Prof. Alberto Piazza, Italië  
Prof. Karol Sikora, Groot-Brittannië  
Dr. Karl Heusler, Zwitserland  
Prof. Marc Girard, Frankrijk  
Prof. Luc Montagnier, Frankrijk  
Prof. John Mallard, Groot-Brittannië  
Prof. Sten Grillner, Zweden  
Prof. Hanus Papousek en  
Dr. Mechthild Papousek, Duitsland*

### GRIP OP HET LEVEN

*Dr. Max Perutz, Groot-Brittannië  
Prof. Kai Simons, Finland  
Prof. Antonio Garcia-Bellido, Spanje  
Prof. Werner Arber, Zwitserland  
Prof. Robert Huber, Duitsland  
Mark Cantley, E.E.G.  
Prof. Alan R. Fersht, Groot-Brittannië  
Prof. Dervilla M.X. Donnelly, Ierland  
Dr. Sabine Meinecke-Tillmann, Duitsland  
Dr. Carlos José Rodrigues Jr., Portugal  
Prof. Yves Demarly, Frankrijk  
Prof. Marc Van Montagu, België*

### IN DE VOETSPoren VAN GALILEI

*Prof. Léon Van Hove, België  
Prof. Carlo Rubbia, Italië  
Prof. Egil Lillestøl, Noorwegen  
Dr. Giorgio Brianti, Italië  
Dr. Ian Corbett, Groot-Brittannië  
Prof. Etienne Guyon, Frankrijk  
Prof. Harry van der Laan, Nederland  
Prof. Martin Rees, Groot-Brittannië*

# MEDEDELINGEN

## aan onze abonnees

### DE NIEUWE JAARGANG 1991

Met het volgende nummer begint een nieuwe jaargang van NATUUR & TECHNIEK, die in het totaal weer 12 nummers zal omvatten. De prijs voor een jaarabonnement bedraagt voor 1991 f 120,- of 2350 F, voor studenten f 90,- of 1765 F. In februari ontvangt U een voorgedrukt acceptgiro/ overschrijvingsformulier waarmee U het abonnementsgeld kunt voldoen. Wij verzoeken U vriendelijk uitsluitend op deze manier te betalen. Abonnementen op NATUUR & TECHNIEK worden genoteerd tot schriftelijke opzegging. Verlenging vindt automatisch plaats, tenzij het abonnement uiterlijk op 15 december van het voorafgaande jaar is opgezegd.

### EEN ABONNEMENT VOOR DRIE JAREN

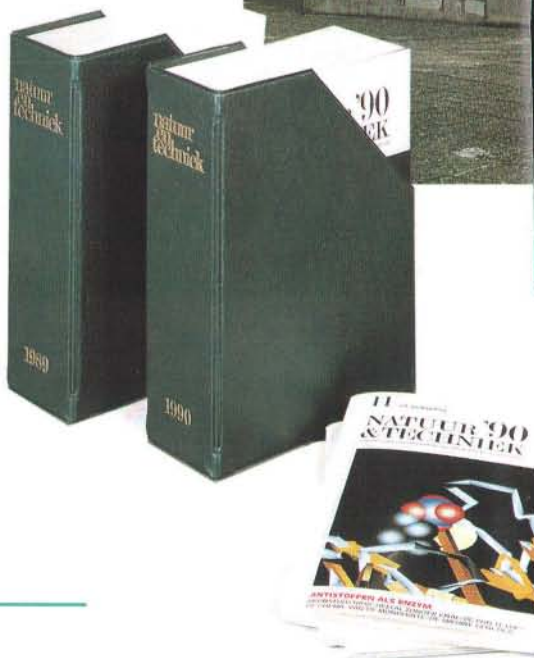
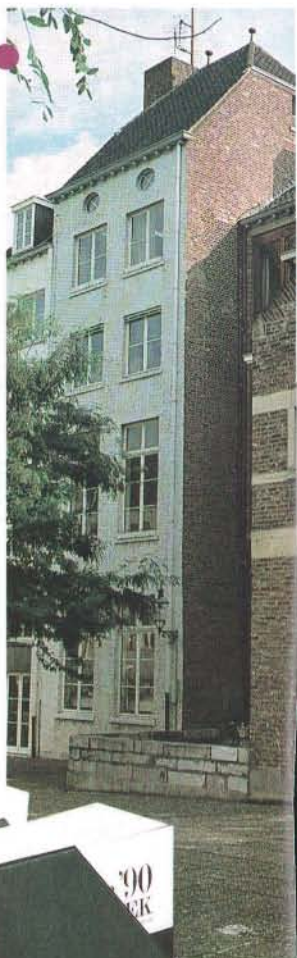
Tevens wijzen wij U erop dat het ook mogelijk is een drie-jaarlijks abonnement te nemen. U profiteert dan van een aanzienlijke korting: f 285,- of 5585 F (in plaats van f 360,- of 7050 F). Bent U geïnteresseerd, belt U dan even onze abonnementenafdeling in Maastricht: 0(0-31)43-254044 (op werkdagen tot 16.30 uur).

### HET BEWAREN WAARD

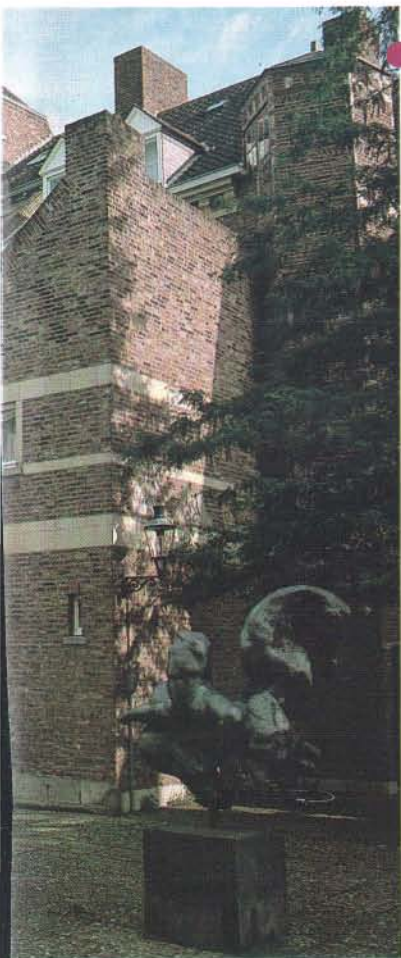
Voor het bewaren van de volledige jaargangen van NATUUR & TECHNIEK zijn speciale cassettes verkrijgbaar. De prijs van deze in groen kunstleer met goudopdruk uitgevoerde cassette is f 15,- of 295 F (exclusief verzendkosten). Eveneens in februari 1991 ontvangt U een acceptgiro/ overschrijvingsformulier waarmee U één of meer cassettes kunt bestellen, voor de nieuwe jaargang en voor de jaargangen vanaf 1979. Voor oudere jaargangen zijn cassettes zonder jaartalopdruk verkrijgbaar. Binnen vier weken na ontvangst van Uw storting zenden wij U de bestelde cassette(s).

### TREFWOORDENREGISTER 1990

Vanaf maart 1991 is het trefwoordenregister voor 1990 verkrijgbaar. Dit wordt automatisch meegeleverd bij bestelling van de opbergcassette voor 1990 of 1991, maar is ook los te bestellen tegen betaling van de verzendkosten. De index voor 1990 vindt U achterin dit nummer.



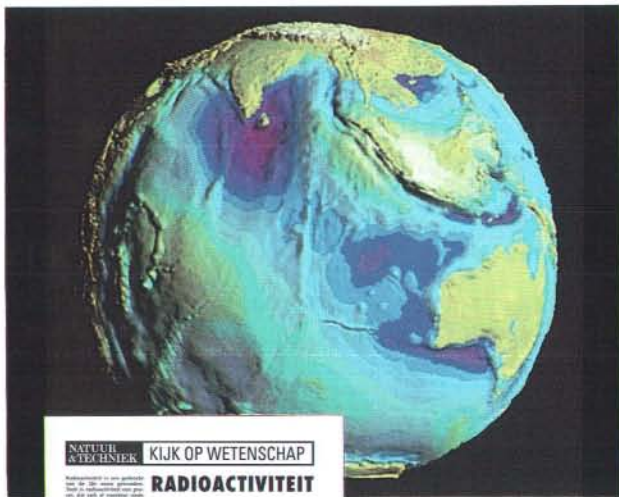




De historische panden (midden en rechts) waarin Natuur & Techniek gevestigd is, liggen aan het plein 'Op de Thermen', boven de grondvesten van een Romeins badhuis, in het centrum van Maastricht.

## KIJK OP WETENSCHAP

Sind oktober 1990 vindt U elke maand een 'studiekatern' in het hart van NATUUR & TECHNIEK. Deze artikelen worden gemaakt in samenwerking met de New Scientist en geven in acht pagina's een bondig en helder overzicht van een bepaalde thematiek uit wetenschap of technologie. De teksten en illustraties zijn gemaakt voor scholing en bijscholing, voor inzicht en overzicht. Vandaar de titel van deze serie: "Kijk op Wetenschap". In de volgende lijst kunt U zien wat U de komende vijf nummers mag verwachten.



NATUUR & TECHNIEK
KIJK OP WETENSCHAP

### RADIOACTIVITEIT

Christine Huber

**V**oor de meeste mensen is radioactiviteit een abstract begrip. Het is een proces dat zich afspeelt op atomaire schaal. Het is een proces dat kan leiden tot ernstige schade aan het menselijk lichaam. Het is een proces dat kan worden gebruikt voor medische doeleinden. Het is een proces dat kan worden gebruikt voor industriële doeleinden. Het is een proces dat kan worden gebruikt voor wetenschappelijke doeleinden.

**De steunbare stroom naar stufstuf**

Hieronder wordt de productie van elektriciteit uit kernenergie beschreven. Het proces begint met het verwarmen van water in een kernreactor. Het verwarmde water wordt gebruikt om stoom te produceren. De stoom wordt gebruikt om een turbine te draaien. De turbine is verbonden met een generator die elektriciteit produceert.

- Januari 1991: de structuur van de aarde
- Februari 1991: kanker en oncogenen
- Maart 1991: kwantumfysica
- April 1991: vegetatie en klimaat
- Mei 1991: Lasers

Van elke studiekatern zijn **overdrukken** beschikbaar voor f 2,50 of 50 F per exemplaar (exclusief verzendkosten), te bestellen bij onze ledenservice in Maastricht: 0(0-31)43-254044 (op werkdagen tot 16.30 uur).

# AIDS

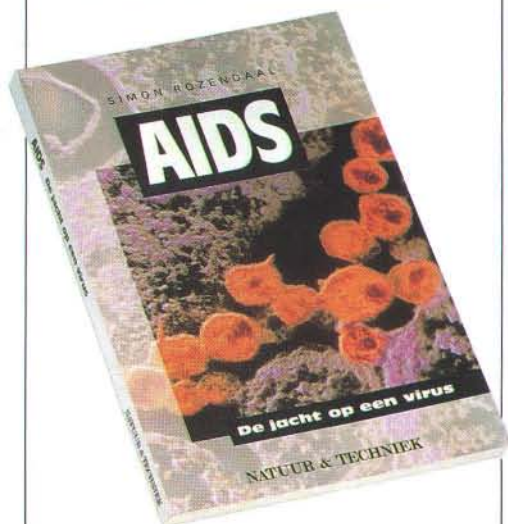
## Een Aids-special in boekvorm

168 pagina's met een schat aan verduidelijkende schema's en illustraties in vierkleurendruk. Een boek over AIDS met als titel: De jacht op een virus.

De hoofdttekst is geschreven door de bekende wetenschapsjournalist ir. Simon Rozendaal. Verder bevat het boek ook een aantal bijdragen van zo'n twintig vooraanstaande virologen, immunologen, hematologen en epidemiologen uit binnen- en buitenland, plus een inleiding van de ontdekker van het Aidsvirus: professor Luc Montagnier.

Deze rondgang langs de belangrijkste centra van onderzoek laat de lezer van zeer nabij getuige zijn van een internationale jacht op het meest gevreesde en meest ongrijpbare virus van de mensheid: belastende feiten, sterke en zwakke vermoedens, maar ook de onenigheid in het forum van de wetenschappelijke "getuigen".

Prijs fl 35,-. Voor abonnees fl 25,-.  
Zie de bestelkaart achter in dit nummer.



## AUTEURS

**Dr F.H.J. Claas** ('Geneeskunde') studeerde van 1970 tot 1976 biologie aan de RU Leiden en promoveerde daar in 1985. Sinds zijn studie werkt hij bij het AZL. Hij is verantwoordelijk voor de immunologische voorbereiding van patiënten die in Leiden of Rotterdam een hart- of niertransplantatie ondergaan en leidt een onderzoeksgroep. Claas werd in 1951 in Eindhoven geboren.

**Prof dr B.L. Feringa** ('Scheikunde') is geboren in Emmen, op 18 mei 1951. Hij studeerde scheikunde in Groningen en promoveerde daar in 1978. Daarna werd hij medewerker van Shell-laboratoria in Amsterdam en Engeland. In 1985 keerde hij terug naar de Groningse universiteit, waar hij sinds 1988 hoogleraar organische chemie is.

**Prof dr R.M. Kellogg** ('Scheikunde') is op 24 december 1939 in Los Angeles, Californië, geboren. Hij ging in 1961 scheikunde studeren aan de University of Kansas en sloot in 1965 zijn studie af met een promotie. In 1975 werd hij hoogleraar organische chemie in Groningen. Tegenwoordig is hij ook hoofdredacteur van *Recueil des travaux chimiques des Pays-Bas*.

**Dr J.W. van Holten** ('Natuurkunde'), in 1952 geboren in Den Haag, zette na zijn studie en promotie zijn onderzoek aan de RU Leiden voort. Daarna werkte hij voor CERN in Genève en voor de Bergische Universität in het Duitse Wuppertal. Sinds 1985 staat hij aan het hoofd van de afdeling theoretische fysica van NIK-HEF-H in Amsterdam.

**Drs G. Stout** ('Explosiechemie') is op 25 maart 1950 in Emmen geboren. Hij studeerde scheikunde in Groningen. Momenteel is hij docent scheikunde bij de faculteit onderwijs van de Noordelijke Hogeschool Leeuwarden. Daarnast is hij wetenschapsjournalist en mede-auteur van de methode *Exact—scheikunde voor havo/vwo*.

**Prof dr A. Brouwer** ('Ijstijden') is sinds 1983 emeritus hoogleraar van de RU Leiden. Hij studeerde geologie in Groningen en Leiden. Daar promoveerde hij in 1948. Brouwer was wetenschappelijk assistent, 'houwer' bij Staatsmijnen, conservator van het Rijksmuseum voor geologie en mineralogie in Leiden en natuurwetenschappelijk expert in Suriname. In 1954 werd hij docent aan de Leidse universiteit, in 1961 hoogleraar.



## Nobelprijzen

---

Het is min of meer traditie geworden, dat Natuur & Techniek een bijdrage levert aan de feestelijkheden aan het einde van het jaar. Die bestaat vooral uit een overzicht van de buitengewone prestaties die aanleiding zijn geweest voor de toekenning van de meest prestigieuze wetenschappelijke prijzen ter wereld, de Nobelprijzen. Dit jaar wordt dit overzicht gecombineerd met een technisch-historisch artikel over de herkomst van het (aanzienlijke) prijzengeld: springstof. Er is gesuggereerd, zelfs wel gesneerd, dat Alfred Nobel de prijs zou hebben ingesteld om zijn geweten te sussen. Springstoffen worden niet direct geassocieerd met vrede en vooruitgang, en de Nobelprijzen zouden zijn ingesteld om de effecten tegen te gaan van het vernietigingswerk dat de instelling ervan mogelijk heeft gemaakt. Uit het artikel van Stout (pag. 848) komt naar voren, dat deze gedachte op weinig feiten kan steunen. Het dynamiet dat Nobel heeft uitgevonden en waarmee hij zeer rijk is geworden, heeft maar heel beperkte militaire toepassingen en is vooral van belang voor civiel gebruik: in de mijnbouw, bij de aanleg van tunnels en wegen enzovoorts.

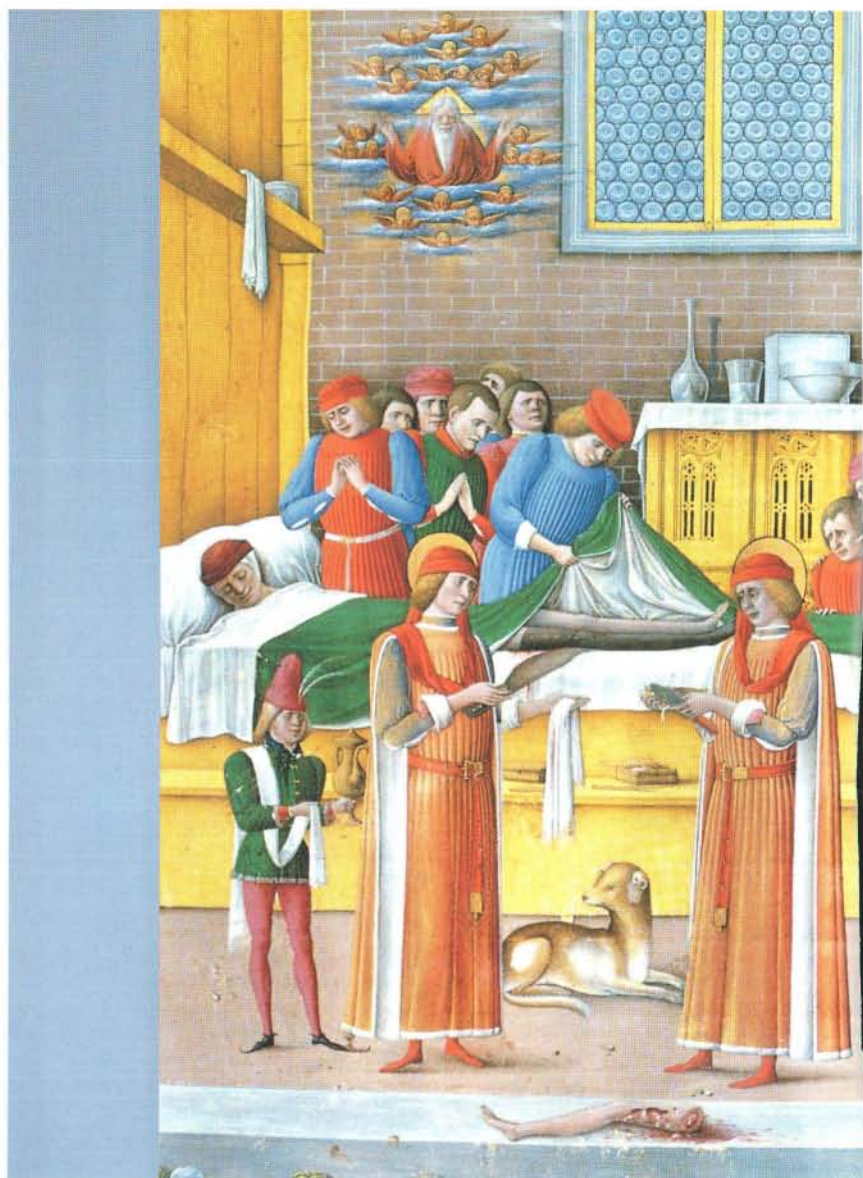
Over de prijzen zelf is al vaak gezegd, dat wie de prijs krijgt die zeker heeft verdiend, maar dat niet iedereen die hem verdient de prijs ook krijgt. Dat geldt dan vooral voor de natuurwetenschappen; over de prijzen voor literatuur, voor economie en voor vrede zijn de meningen minder unaniem. De commissie die de prijzen toekent is er geregeld van beschuldigd met de laatstgenoemde prijzen eerder hulde te betuigen aan een bepaald politiek standpunt dan aan absolute kwaliteit.

Het ligt voor de hand dat er bij de toekenning van de prijzen een zekere achterstand ontstaat. In de eerste plaats gewoon omdat er maar eenmaal per jaar een prijs voor een bepaald vakgebied wordt uitgereikt, terwijl er niet slechts eenmaal per jaar een Nobelprijswaardige publikatie verschijnt. In de tweede plaats ook, omdat het Nobelcomité niet over één nacht ijs gaat. Nobelprijswaardig werk moet niet alleen maar veelbelovend zijn, maar al een grote belofte hebben waargemaakt, al bewezen hebben dat het inderdaad belangrijk was.

Soms worden de achterstanden wel erg groot. Het werk van Friedman, Kendall en Taylor dat dit jaar de prijs van de natuurkunde krijgt, is zeker van groot belang, maar inmiddels al wel een kwart eeuw oud. Corey (scheikunde) komt naar voren als een geniale aartsvader van de organische chemie, en zijn werk gaat nog steeds op hoog niveau door, maar ook hij krijgt de prijs voor werk dat lang geleden is verricht. Het werk van de geneeskundigen Murray en Thomas kan al evenmin recent worden genoemd, zelfs in de termen van de Nobelprijzen.

Is dat alleen een kwestie van achterstand, of hebben de pragmatische jaren '80 toch wat minder Nobelprijswaardige doorbraken opgeleverd?

# ONDERDRUKTE AFWEER



Als Cosmos en Damianus, de heilige tweelingbroers die volgens de legende het been van een overleden Moor transplanteerden naar een blanke, slaagden Joseph Murray (rechts) en Donall Thomas (links) erin zieke weefsels en organen te vervangen door gezonde.

**F.H.J. Claas**

*Afdeling Immunohaematologie en Bloedbank  
Academisch Ziekenhuis Leiden*

Nobelprijs geneeskunde 1990





Het afweerapparaat dat ons lichaam beschermt tegen virussen en bacteriën, blijkt ook bijzonder effectief tegen getransplanteerde weefsels en organen. Dat is niet verwonderlijk; een hart of nier van iemand anders is voor ons immuunsysteem evengoed een indringer. Voor veel mensen die lijden aan ernstige ziekten of verwondingen biedt een donororgaan echter de enige kans op herstel. Dankzij de onderzoeksspanningen van Joseph Murray en Don Thomas, beschikken we nu over middelen die de natuurlijke afweer kunnen onderdrukken als nieren of beenmerg van eigenaar moeten wisselen.



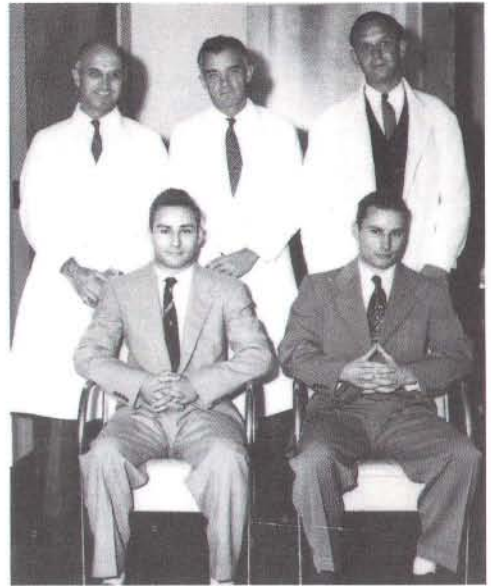
De eerste geslaagde transplantatie van een lichaamsdeel vond al plaats voor onze jaartelling. Voor dit kunststukje waren de Syrische chirurgen Cosmos en Damianus verantwoordelijk. Zij bleken in staat het been van een zojuist gestorven Moor te transplanteren naar een blanke, bij wie vanwege kanker een been was geamputeerd. De ontvanger werd de volgende dag wakker met een gezond, zwart been, zonder enige bijverschijnselen.

Hoewel de feiten van dit geval op zijn minst dubieus zijn, laat deze legende wel zien dat men reeds in de oudheid gefascineerd was door operaties waarbij zieke weefsels of organen konden worden vervangen door gezonde transplantaten. In de praktijk bleek dit echter niet zo eenvoudig. Het immuunsysteem, dat verantwoordelijk is voor de afweer tegen vreemde indringers zoals bacteriën en virussen, reageert net zo krachtig tegen lichaamsvreemde transplantaten. Dat resulteert in afstoting van de nieuwe organen. De toepassing van chemische stoffen die de afweer kunnen onderdrukken, de zogenaamde *immunosuppressiva*, heeft uiteindelijk geleid tot het huidige succes van de transplantatiechirurgie.

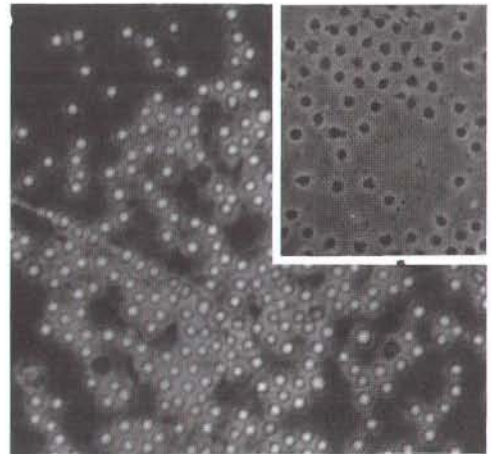
### Historisch perspectief

Aan het begin van deze eeuw werden de chirurgische technieken ontwikkeld om bloedvaten met elkaar in verbinding te brengen. Hierdoor was het technisch gezien mogelijk geworden om orgaantransplantaties te verrichten. In 1936 plantte een Russische chirurg voor het eerst een menselijke nier over. Het is onwaarschijnlijk dat die nier daarna nog gefunctioneerd heeft. Zij was namelijk afkomstig van een donor die al geruime tijd dood was; de patiënt stierf dan ook 48 uur na de operatie. Latere pogingen in Parijs en Boston waren eenzelfde lot beschoren.

Toentertijd werden reeds huidtransplantaties toegepast om extreem grote brandwonden te behandelen. Wanneer men gezonde huid van de patiënt zelf transplanteerde naar het beschadigde huidoppervlak leidde dit tot goede resultaten. Transplantaten van andere donoren waren echter minder succesvol. Studies in de jaren veertig lieten zien dat wanneer een donorhuid was afgestoten en er een tweede transplantaat van dezelfde donor werd gebruikt, deze veel sneller werd afgestoten dan het eerste



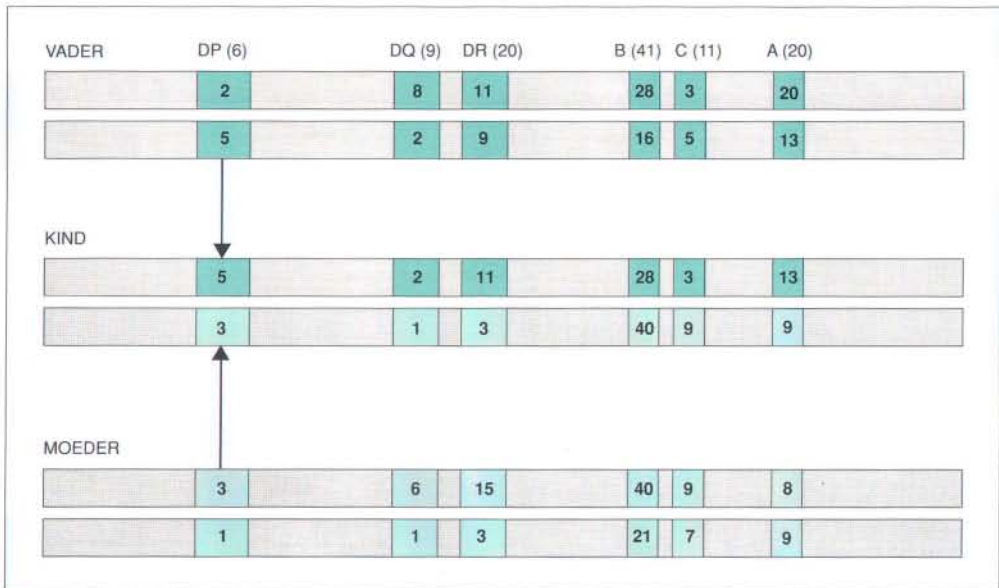
1



2

transplantaat. Dierexperimenten bewezen uiteindelijk dat het hier een actieve immunologische reactie betrof, specifiek gericht tegen het weefsel van de betreffende donor en niet tegen dat van andere donoren. De structuren waartegen deze immunologische afweer gericht was bleken erfelijk bepaald, aangezien er geen afstoting plaatsvond bij huidtransplantaten die tussen eenenige tweelingbroers of -zussen werden uitgewisseld.





3

1. Richard Herrick, links-voor, leed aan een nierziekte waar niets meer aan te doen viel. Hij overleefde als eerste mens een niertransplantatie. De donornier kwam van zijn identieke-tweelingbroer Robert.

2. Bij een HLA-typering laat men lymfocyten (witte bloedlichaampjes) reageren met antiserum tegen een bekend HLA-antigeen. Overleven de cellen, dan zijn ze niet in het bezit van het allel dat het geteste antigeen produceert. Sterven ze (inzet) dan komt het serum-HLA wel overeen met het allel. Voor elk van de ruim honderd HLA-allelen moet de reactie uitgevoerd worden.

3. Iedereen heeft voor elk van de zes HLA-genen één allel van zijn vader en één allel van zijn moeder geërfd. Elk gen kent meerdere allelen. Zo zijn er 6 allelen bekend voor HLA-gen DP en maar liefst 41 voor B. Iedereen heeft dus een combinatie van twaalf allelen uit een totaal van 107. Het aantal mogelijke combinaties is astronomisch groot.

waarbij een 24-jarige patiënt een nier kreeg van zijn gezonde tweelingbroer. Deze getransplanteerde nier bleef meer dan zeven jaar goed functioneren, totdat de patiënt overleed ten gevolge van een hartaanval.

Dit eerste succes werd gevolgd door tientallen andere geslaagde niertransplantaties tussen identieke tweelingen. De al genoemde immunologische barrière stond echter transplantatie bij andere donor-ontvangercombinaties nog altijd in de weg.

### Transplantatie-antigenen

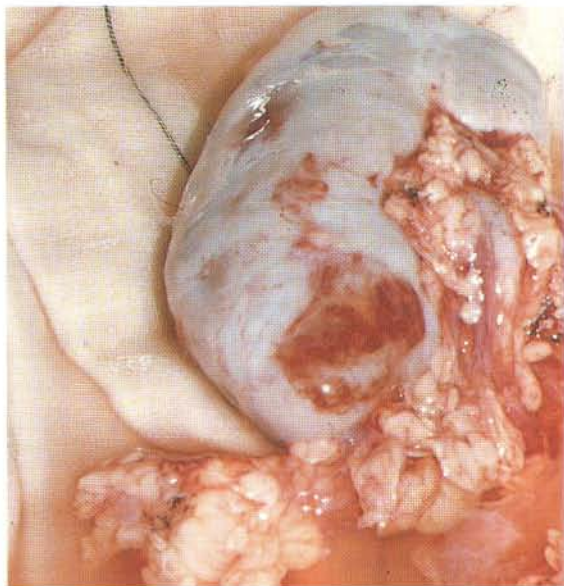
De erfelijk bepaalde structuren waartegen de immunologische afstotingsreactie zich voornamelijk richt zijn de AB0-bloedgroepen — in 1902 door Landsteiner ontdekt — en het zeer gecompliceerde systeem van HLA-antigenen, ontdekt door Dausset, Payne en Van Rood. Het *antigeen* is datgene wat door een antistof uit het immuunsysteem als lichaamsvreemd wordt herkend. Antigenen kunnen zowel losse molekulen zijn als molekulen op het oppervlak van een cel. Het HLA-systeem, dat zijn genetische basis heeft op chromosoom 6, codeert voor zoveel verschillende transplantatie-antigenen, dat de kans zeer klein is dat twee onverwante individuen dezelfde transplantatie-anti-

Joseph Murray, een plastisch chirurg uit Pennsylvania, werd tijdens de Tweede Wereldoorlog veelvuldig geconfronteerd met de afstoting van getransplanteerde huiden. Toen hij in het Peter Bent Brigham-ziekenhuis in Boston kwam te werken, vroeg hij zich af of ook niertransplantaten uitgewisseld konden worden binnen een enkele tweeling, zonder dat er afstotingsverschijnselen optraden. Dit leidde in 1954 tot de eerste geslaagde niertransplantatie,

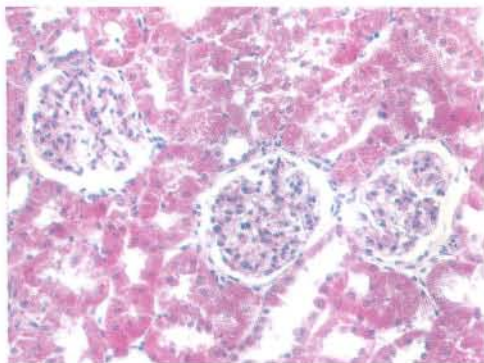
genen bezitten. Wanneer donor en ontvanger veel HLA-antigenen gemeenschappelijk hebben, blijven transplantaten wel iets langer functioneren, maar uiteindelijk worden ze toch afgestoten.

### Onderdrukking van de afweer

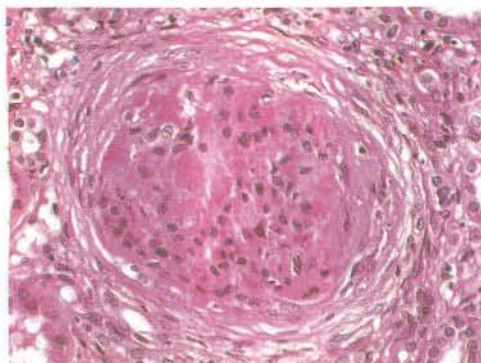
De oplossing van het probleem van transplantaat-afstoting werd gezocht in middelen die de immunologische reactie konden onderdrukken. De overlevenden van de eerste atoombom in Hiroshima hadden een duidelijk verminderde afweer tegen allerlei infecties. Hieruit leidde men af dat straling de afweer kan onderdrukken, en wellicht zelfs de afstoting van transplantaten kan voorkomen. Bij patiënten die in het ziekenhuis eerst een totale lichaamsbestraling ondergingen, bleken vreemde organen inderdaad langer te overleven. De bijverschijnselen van de bestraling waren echter zodanig, dat



6



4



5

de meeste patiënten aan de gevolgen daarvan overleden.

De experimenten die Schwartz en Dameshek in 1959 uitvoerden, vormen de basis voor de huidige wijze van immuunonderdrukking. Beide onderzoekers toonden aan dat konijnen die waren ingespoten met 6-mercaptopurine, een medicament om tumoren te onderdrukken, geen antistoffen maakten tegen een lichaamsvreemd eiwit dat tegelijkertijd werd ingespoten. De dieren waren wel in staat om antistoffen te vormen tegen eiwitten die niet tegelijk met het 6-mercaptopurine waren toege-

diend. Dit leek op de specifieke onderdrukking van de immunologische afweer waarop transplantatie-chirurgen met smart zaten te wachten.

### De bijdrage van Joseph Murray

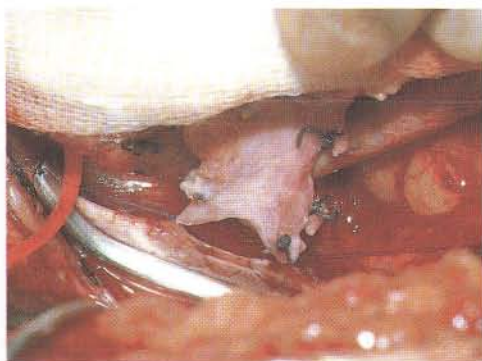
De verdienste van de chirurg Murray is dat hij, uitgaande van de bovengenoemde experimenten met konijnen, chemische immunosuppressiva heeft geïntroduceerd in de klinische niertransplantaties. Nadat experimentele niertransplantaties in honden hadden aangetoond



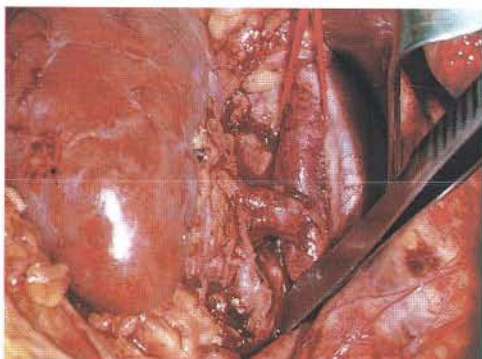


4 en 5. Als alles goed gaat treedt er na de transplantatie geen afstoting op. Een goed 'aangeslagen' nier (4) ziet er normaal uit. Bij afstoting (5) sterft het weefsel af en slibben bloedvaten dicht.

6, 7 en 8. Een nier klaar voor transplantatie (6) ziet er nogal bleek uit. Tijdens de operatie wordt de nier verbonden met de urineleider en de bloedvaten (7) van de patiënt, waarna de doorbloeding weer op gang komt en de nier zijn normale rode kleur terugkrijgt (8).



7



8

dat azathioprine (een stof afgeleid van het 6-mercaptopurine) de transplantaatoverleving gunstig beïnvloedde, werd door zijn groep in 1961 begonnen met niertransplantaties met onverwante donoren, waarbij de afweer van de patiënt werd onderdrukt met azathioprine. De eerste twee patiënten overleden omdat de optimale dosis van het medicament in de hond, giftig bleek te zijn voor mensen. Bij een volgende patiënt, waarbij de dosis azathioprine wat verlaagd werd, functioneerde het transplantaat echter langer dan een jaar. Dat betekende het begin van een zeer succesvol tijdperk in de klinische orgaantransplantatie.

De toepassing van immunosuppressieve medicamenten (aanvankelijk azathioprine alleen, later in combinatie met corticosteroïde hormonen) en *matching* voor de transplantatie-antigenen (selectie van donor-ontvangercombinaties, die wat betreft hun HLA-antigenen erg veel op elkaar lijken) hebben er uiteindelijk toe geleid dat niertransplantaties niet enkel bij identieke tweelingen, maar ook bij onverwante donoren een grote kans op succes hebben.

### Beenmergtransplantatie

Zoals zieke nieren kunnen worden vervangen door gezonde, kan men beenmerg vervangen bij patiënten die afwijkingen hebben wat betreft hun bloedbeeld. Beenmergcellen vormen namelijk de voorlopercellen van alle cellen die in het bloed aanwezig zijn, zoals rode bloedlichaampjes (erythrocyten), bloedplaatjes (thrombocyten) en witte bloedcellen (leukocyten). Als er iets mis is met het beenmerg raakt de verhouding tussen de aantallen van de verschillende cellen verstoord.

Aanvankelijk werden beenmergtransplantaties verricht bij patiënten die geen goede aanmaak van bloedcellen hadden ten gevolge van een stralingsongeval of iets dergelijks. Later kwamen daar ook mensen voor in aanmerking die leden aan bloedkanker (leukemie) en daardoor teveel witte bloedcellen hadden.

Aangezien de witte bloedcellen verantwoordelijk zijn voor de immunologische afweer, kunnen beenmergtransplantaties op verschillende manieren misgaan. Zo kan de patiënt het getransplanteerde beenmerg afstoten. Deze situatie is vergelijkbaar met de afstoting van een niertransplantaat. Maar het kan ook gebeuren dat witte bloedcellen uit het getrans-

planteerde beenmerg, transplantatie-antigenen op de lichaamscellen van de patiënt als vreemd herkennen. Dat leidt tot een zeer ernstig ziektebeeld, waarbij onder andere de huid en het darmweefsel van de patiënt worden afgestoten en waaraan de patiënt uiteindelijk kan overlijden. Dit ziektebeeld wordt de *graft-versus-hostziekte* (het transplantaat richt zich tegen de gastheer) genoemd.

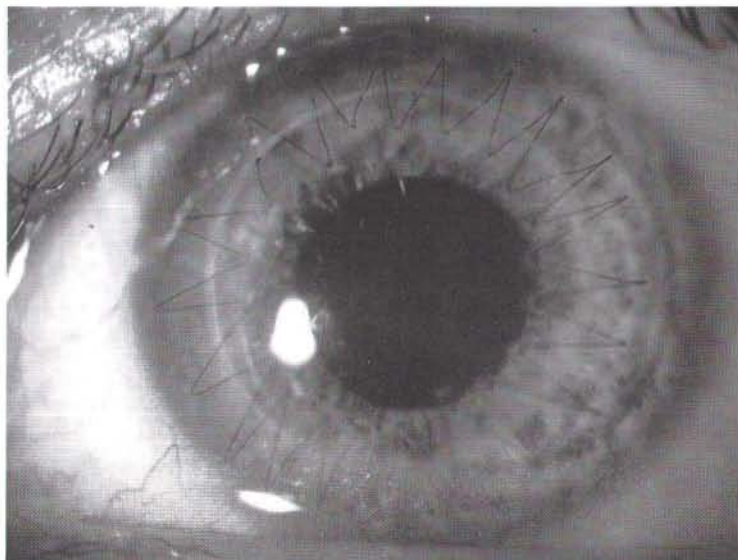
### De bijdrage van Donall Thomas

Don Thomas, al sinds jaren verbonden aan het Fred Hutchinson Cancer Research Center en de oncologische afdeling van de universiteit van Washington te Seattle, is er als eerste in geslaagd om de graft-versus-hostziekte te onderdrukken. Hij deed dat met behulp van een chemische stof. Experimentele beenmergtransplantaties bij honden hadden laten zien dat het medicament methotrexaat in staat bleek de graft-versus-hostziekte minder ernstig te laten verlopen en die soms zelfs wist te voorkomen. Donall Thomas besloot daarop dit medicament ook toe te passen bij beenmergtransplantaties in de mens. Inderdaad bleek de stof ook bij mensen in staat de ernst van de graft-versus-hostziekte gunstig te beïnvloeden. Dit resultaat markeert het begin van de klinische beenmergtransplantatie.

Hoewel Thomas de Nobelprijs gekregen heeft voor de introductie van methotrexaat, dient niet onvermeld te blijven dat zijn groep in Seattle steeds een vooraanstaande rol heeft gespeeld bij nieuwe ontwikkelingen en toepassingen op het gebied van de beenmergtransplantatie. De eerste transplantaties bij patiënten met leukemie waren bijvoorbeeld ronduit teleurstellend. Hoewel de patiënten vlak voor transplantatie werden bestraald om de kankercellen te doden, overleden praktisch alle patiënten, mede omdat het ziektebeeld snel terugkwam. Thomas ontwikkelde het beleid om vóór de beenmergtransplantatie eerst de leukemische of tumorcellen via giftige medicijnen te verwijderen, zodat de patiënt geen aantoonbare leukemie-cellen meer over heeft. Deze werkwijze heeft het mogelijk gemaakt dat beenmergtransplantatie bij leukemie-patiënten heden ten dage tot volledig herstel kan leiden.

### Toekomstige ontwikkelingen

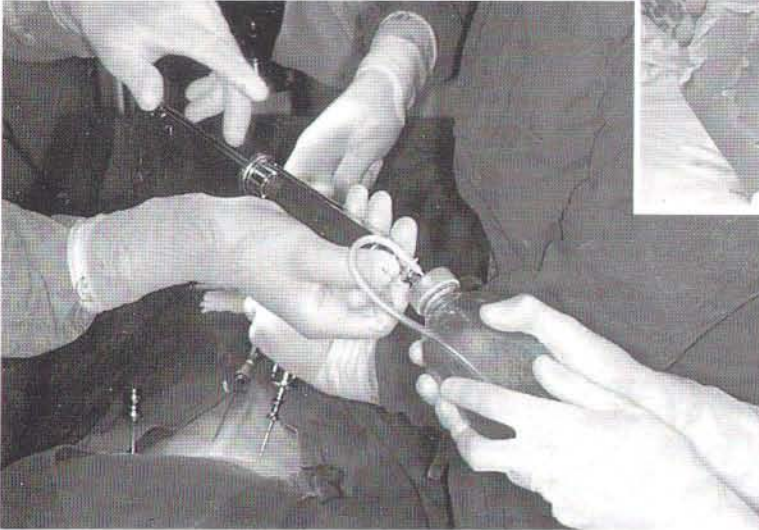
De introductie van afweeronderdrukkende medicijnen door Murray en Thomas heeft er toe geleid dat de transplantatie van organen zoals nieren, harten, levers en longen en weefsels zoals beenmerg, hoornvlies en huid, een reële therapie is geworden. De chemische stoffen die zij gebruikten, maar ook de recent ontwikkelde



9. Vanwege een erfelijke hoornvlies-ziekte zag de twintigjarige vrouw aan wie dit oog toebehoort, vrijwel niets meer. Nu, vijf maanden na de transplantatie, ziet haar nieuwe hoornvlies er nog steeds prachtig helder uit.

10 en 11. Beenmerg wordt met een zware 'injectiespuut' verzameld uit het bot van een donor. De eigenlijke transplantatie is in wezen niets anders dan een bloedtransfusie; het beenmerg komt via een infuus in de ader van de ontvanger terecht, en vindt van daaruit zijn weg naar de botten. Beenmergtransplantatie kan mislukken doordat de nieuwe beenmergcellen zich tegen de gastheer keren en afstoting van bijvoorbeeld de huid veroorzaken (11).





10

en veel effectievere immunosuppressieve stoffen zoals cyclosporine-A en FK506, hebben alle het nadeel dat zij niet specifiek zijn in hun werking. In hun onderdrukkend effect op de afweer maken deze stoffen geen onderscheid tussen witte bloedcellen die het transplantaat zullen afstoten, en witte bloedcellen die bacteriën, virussen of potentiële kankercellen uit het lichaam moeten verwijderen. Daardoor hebben patiënten na een transplantatie een veel grotere kans op infecties en tumoren dan gezonde individuen.

Het huidige onderzoek richt zich op de ontwikkeling van afweeronderdrukkende middelen die wel een onderscheid kunnen maken. Het is onwaarschijnlijk dat dit kan met chemische immunosuppressiva zoals die zijn toegepast door Murray en Thomas. Misschien dat het wel lukt met monoclonale antistoffen. Die zouden enkel gericht kunnen zijn tegen de witte bloedcellen die specifiek het transplantaat herkennen. Door ze te koppelen aan een toxische stof, kunnen de monoclonalen de cellen uit de transplantatiebarrière vergiftigen. Uiteindelijk zou deze aanpak de immunologische afstoting van een transplantaat specifiek kunnen onderdrukken.



11

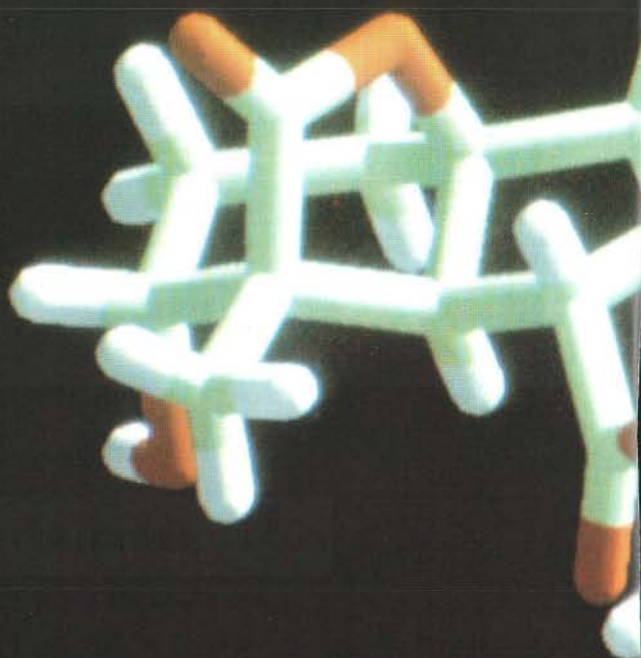
#### Literatuur

- Tweel JG van den e.a. Immunologie - Het menselijk afweersysteem. Maastricht: Wetenschappelijke Bibliotheek, deel 12, Natuur & Techniek, 1988.  
 Roitt I, Brostoff J, Male D. Immunology. Londen: Grower Medical Publishing, Churchill Livingstone, 1989, 2de druk.  
 Het Menselijk Lichaam - Een ongelooflijke machine. Maastricht: National Geographic Society/Natuur & Techniek, 1990.

#### Bronvermelding illustraties

- Society of Antiquaries of London: 824-825  
 AP-foto, Amsterdam: 825  
 J. Murray, Harvard Medical School, Boston, VS: 1  
 Behringwerke AG, Frankfurt am Main, D: 2  
 Dr J. Rozing, TNO, Rijswijk: 4 en 5  
 Dr J.H. van Bockel, afd. Heelkunde, Academisch Ziekenhuis Leiden: 6, 7 en 8  
 Mw dr H.J. Völker-Dieben, Diaconessenhuis, Leiden: 9  
 Prof dr J.J. van Rood, afd. Immunohaematologie, AZ Leiden: 10  
 Dr F. Zwaan, afd. Beenmergtransplantatie, AZ Leiden: 11

# ONTBINDEN IN FACTOREN



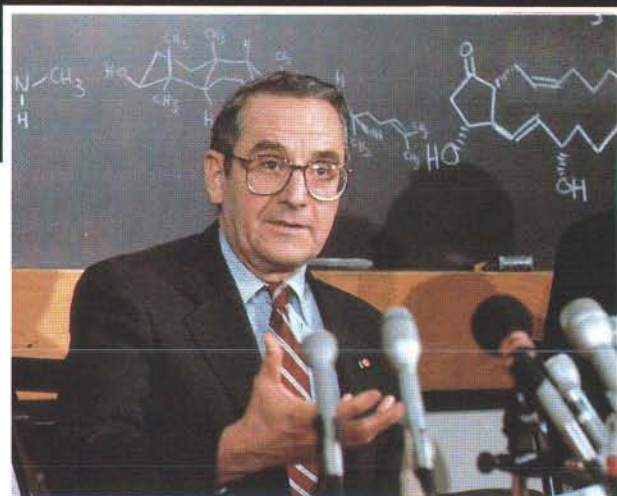
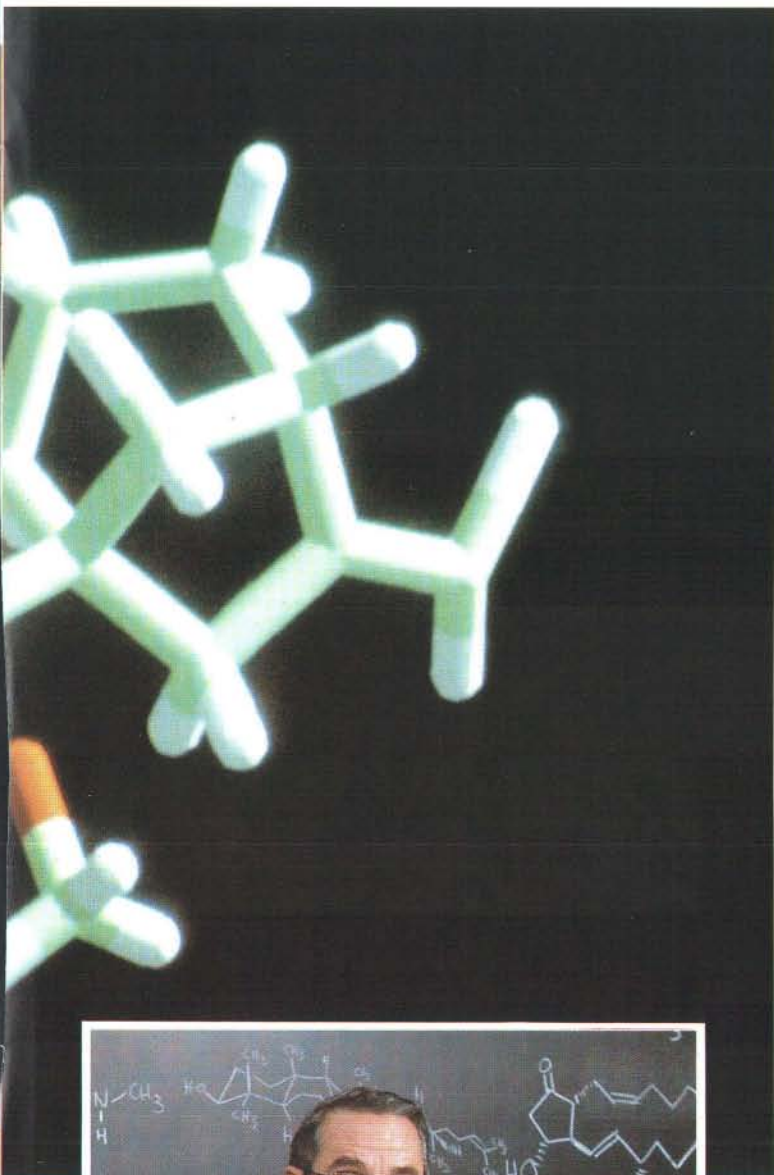
**B.L. Feringa en R.M. Kellogg**

*Vakgroep Organische Chemie  
Rijksuniversiteit Groningen*

Met een grote groep chemici heeft Elias Corey gewerkt aan de synthese van het gibberellinezuur, een diterpeen. Dit plantenhormoon met ingewikkelde ringstructuur stimuleert de celstrekking in sommige planten. Het hier afgebeelde molecuul is de methylester van het gibberellinezuur. Op het schoolbord achter Corey staat de structuurformule van een prostaglandine afgebeeld. Met de synthese van dit type verbindingen heeft Corey bij vele vakbroeders bewondering geoogst.

Nobelprijs scheikunde 1990





Dit jaar is de Nobelprijs voor de scheikunde toegekend aan de organisch-chemicus Elias J. Corey. Corey, die onlangs door collega's waarschijnlijk de meest produktieve organisch-chemicus ter wereld werd genoemd, heeft een belangrijke bijdrage geleverd aan de moderne organische chemie. De Nobelprijs kreeg hij onder meer voor zijn werk aan de retrosynthese. Met dit systeem kan een chemicus de meest efficiënte manier vinden om een ingewikkeld molecuul te maken uit simpele bouwstenen. Dit systeem is dermate logisch, dat het ook toepasbaar bleek in computerprogramma's. Organisch-chemici kunnen nu met behulp van de computer steun krijgen in het zoeken van het meest geschikte recept voor het gewenste molecuul vinden.

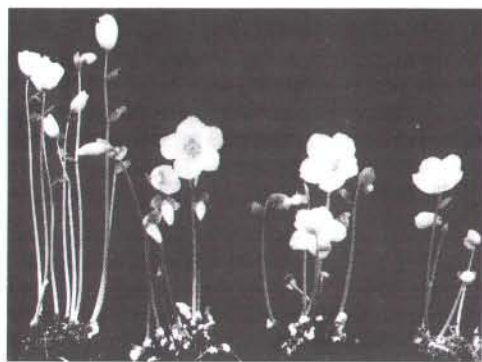
Professor Elias J. Corey, de winnaar van de Nobelprijs voor de scheikunde in 1990, heeft de laatste veertig jaar in belangrijke mate het gezicht van de synthetisch-organische chemie bepaald. Na zijn promotie in 1950 aan het Massachusetts Institute of Technology werd Corey op eenentwintigjarige leeftijd aangesteld als hoogleraar aan de University of Illinois. Onmiddellijk daarna volgde een stroom publicaties van de jonge onderzoeker. Corey had een brede belangstelling binnen de chemie, waarbij de structuur van chemische verbindingen een hoofdthema was, en was enorm produktief. Hij publiceerde over de structuuropheldering van complexe organische stoffen die in de natuur voorkomen, over de toepassingen van nieuwe theoretische ontwikkelingen in de organische en anorganische chemie en over nieuwe, door hem bedachte reacties om verbindingen te synthetiseren.

In 1959 verhuisde Corey naar de beroemde Harvard University, alwaar zijn activiteiten in de synthese een nieuwe wending kregen. Enige uitleg van het begrip 'synthese' is hier op zijn plaats. Als voorbeeld beschouwen we het structureel zeer ingewikkelde plantenhormoon gibberellinezuur. Synthese houdt de bereiding in van dit doelmolekuul uit eenvoudige synthese-

bouwstenen. In de praktijk zijn dit meestal verbindingen met drie tot zes koolstofatomen. Zo'n synthese is vanzelfsprekend een intellectuele uitdaging. Nog belangrijker is het, dat een bruikbare synthese mogelijkheden biedt voor wijzigingen in een molekuulstructuur. Daardoor kan met de biologische eigenschappen van een molekuul worden gemanipuleerd. De vorming van gibberellinezuur is een voorbeeld van een zeer moeilijke totaalsynthese. Corey werkte hieraan met zo'n twintig gepromoveerde medewerkers.

Corey heeft een nieuwe richting gegeven aan hoe zo'n complexe synthese kan worden uitgevoerd. Daarvoor bedacht hij eerst een algemeen systeem, *retrosynthese*, waarbij complexe structuren op systematische wijze worden ontleed in de kleinere bouwstenen. Met deze bouwstenen kan een chemicus uiteindelijk in omgekeerde richting daadwerkelijk de synthese uitvoeren. Dit systeem houdt ook rekening met de schrikbarende problemen van de beheersing van stereochemie op elk chiraal (asymmetrisch) atoom.

Vervolgens bracht Corey dit systeem onder in een computerstrategie, LHASA genoemd (Logical Heuristics Applied to Synthetic Analysis). LHASA wordt veelvuldig toegepast in



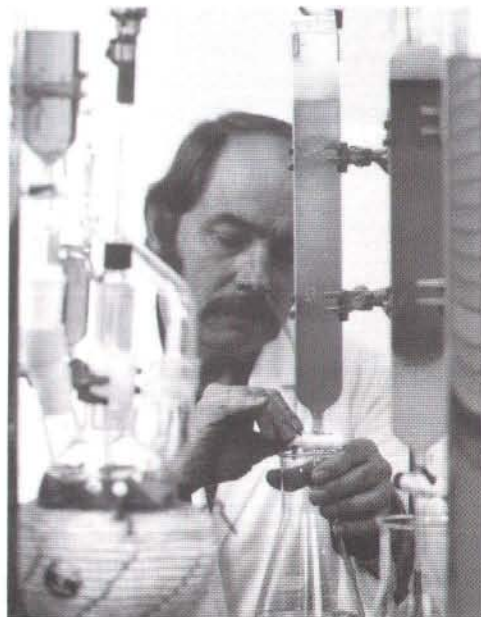
1

1. Bloemen van de kerstroos (*Helleborus niger*) fungeren als proefkonijn in een demonstratie van de biologische werking van gibberellinezuur. Van rechts naar links zijn deze

bloemen behandeld met toenemende concentraties van deze verbinding. De hierdoor veroorzaakte celstrekking resulteert in een duidelijk grotere steellengte.

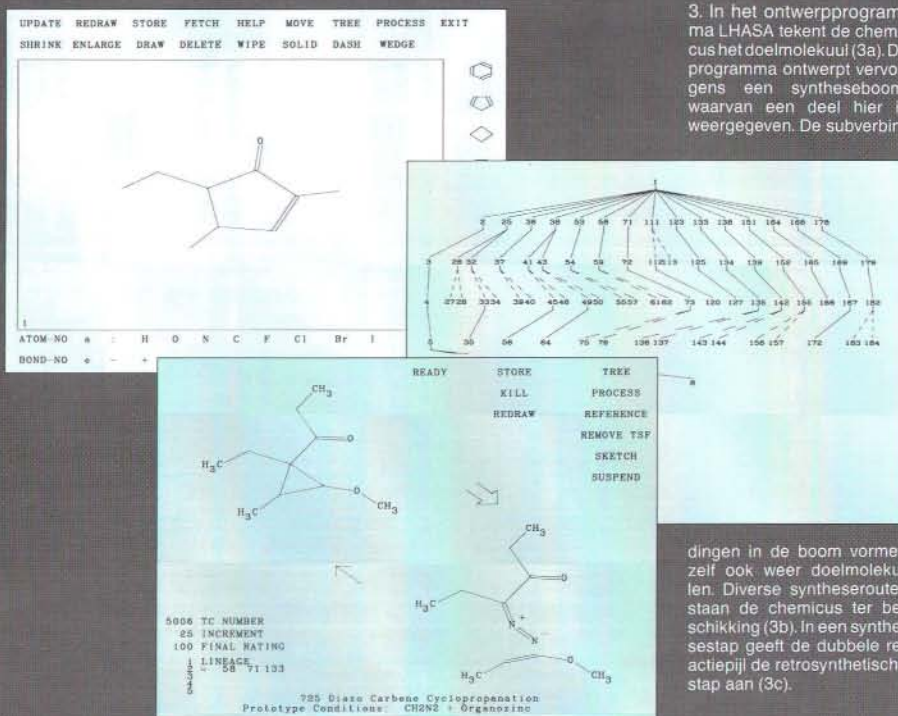
2. Ook al weet men het recept voor een ingewikkelde verbinding, dan nog is de

uiteindelijke organische synthese vaak een lang en moeizaam karwei.



2





3

academische en industriële laboratoria over de hele wereld. Met name in het geneesmiddelenonderzoek maakt men dankbaar gebruik van deze benadering van de chemische synthese. Deze bijdrage van Corey in de logica van de synthese is een hoofdcomponent bij de toekenning van de Nobelprijs.

Harvard is een uitstekende voedingsbodem geweest voor de creatieve Corey. Samen met talrijke getalenteerde medewerkers, waaronder velen die thans belangrijke academische en industriële posities bekleden (koffietafelgesprekken van elk symposium worden verrijkt met geroddel over de 'Corey mafia'), heeft hij de synthese in kaart gebracht.

### Moleculaire complexiteit

De indrukwekkende bijdragen van Corey's onderzoek liggen vooral op het gebied van de volledig kunstmatige bereiding van natuurstoffen, uitgaande van eenvoudige moleculaire bouw-

stenen (natuurstoffen zijn organische verbindingen die van natuurlijke oorsprong zijn). Dit onderzoeksgebied wordt doorgaans aangeduid als *totaalsynthese*. De biologische werking van een ingewikkeld molecuul, bijvoorbeeld de werking als hormoon of antibioticum, wordt bepaald door de verschillende atomen waaruit het is opgebouwd, de manier waarop deze onderling zijn verbonden, de functionele groepen en de ruimtelijke structuur (de vorm) van het molecuul.

Als men een syntheseroute naar een complexe verbinding wil ontwerpen, moet men in de eerste plaats op de hoogte zijn van de factoren die verantwoordelijk zijn voor de complexe moleculaire structuur.

Deze factoren zijn het moleculaire skelet, het aantal en de aard van de functionele groepen in de verbinding, de chemische reactiviteit, de ruimtelijke structuur (stereochemie), de beweeglijkheid of starheid en ten slotte de stabiliteit van het molecuul.

Bij traditionele syntheses startte een onderzoeker doorgaans met het (vaak intuïtief) kiezen van een geschikte uitgangsstof. Door een serie chemische reacties uit te voeren, wordt uit deze uitgangsstof het doelmolekuul bereid. Een grote kennis van verwante structuren, chemische omzettingen die karakteristiek zijn voor een bepaalde structuurklasse, alsmede kennis van reactiemechanismen vormden de basis voor de te volgen route. Elke totaalsynthese werd meestal gezien als een op zich zelf staande onderneming.

### Retrosynthese

De nieuwe retrosynthetische aanpak van Corey beschouwt in eerste instantie het doelmolekuul. Systematisch en stapsgewijs ontbindt de onderzoeker de complexe verbinding tot uiteindelijk goed toegankelijke synthesebouwstenen (*synthons*). Doordat de structuur van een doelmolekuul langs verschillende paden tot steeds eenvoudiger structuren kan worden teruggebracht, ontstaan tegelijkertijd een aantal mogelijke, onafhankelijke syntheseroutes.

De retrosynthetische analyse betekent dus dat structuren gemanipuleerd worden in omgekeerde volgorde, van groot naar klein, van doelmolekuul naar synthons. De structurele kenmerken van het eindprodukt, en niet die van de uitgangsstof, dienen als uitgangspunt voor de synthese. In tegenstelling tot de weer-

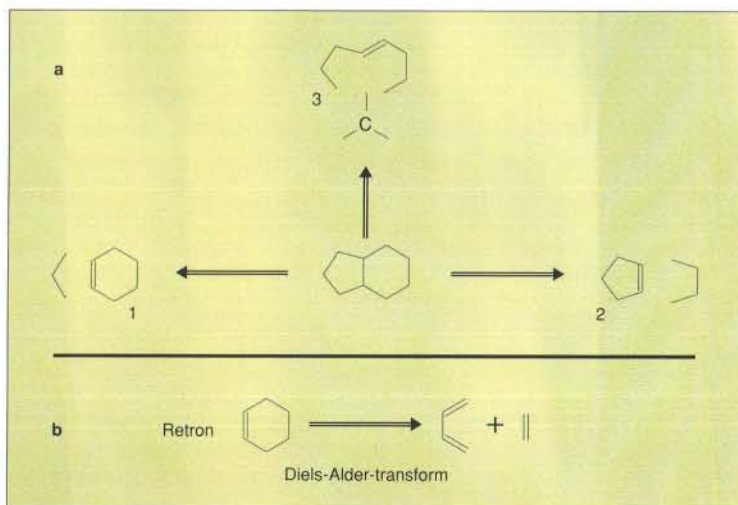
gave van een chemische reactie, wordt in de retrosynthetische analyse een stap aangegeven met een *omgekeerde dubbele pijl*.

Een veel voorkomende structuureenheid in natuurstoffen is de koolstofzesring. Deze ring kan worden gevormd door een zo genaamde 2 + 4 cycloadditie (een Diels-Alder-reactie) van een alkeen en een diën (een koolstofverbinding waarin twee dubbele bindingen door een enkele binding zijn gescheiden). Het omgekeerde van deze synthetische omzetting is in afbeelding 4b weergegeven. De omzetting van een molekuul in zijn synthetische voorloper, heeft Corey een *transform* genoemd, in dit geval een Diels-Alder-transform. De structuureenheid die aanwezig moet zijn om een bepaalde transform mogelijk te maken, noemde Corey een *retron*.

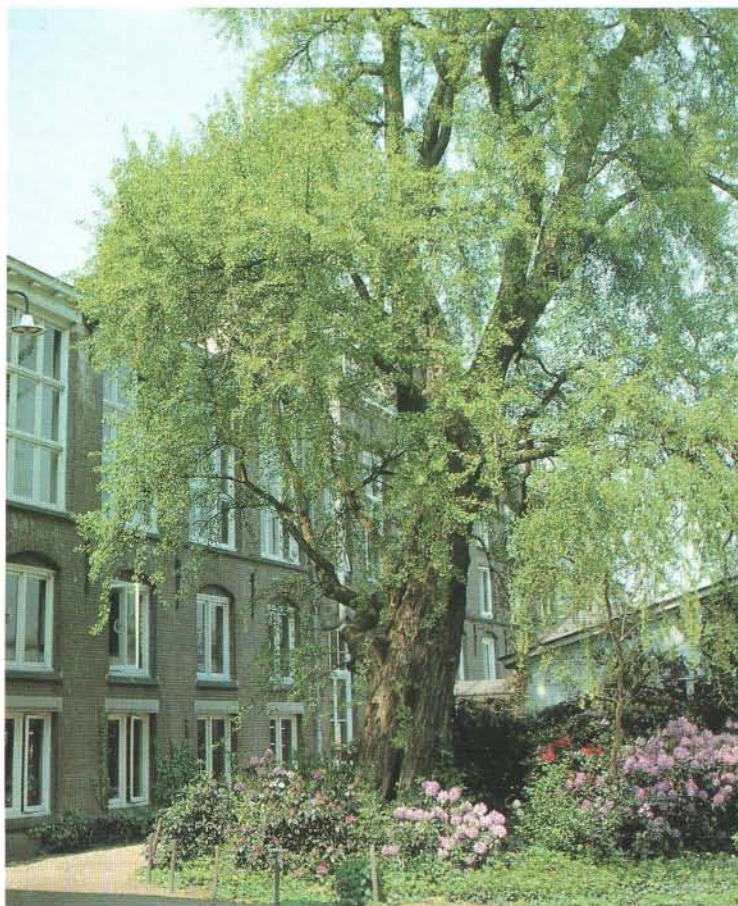
De retrosynthetische benadering kent strategieën op verschillende niveaus, afhankelijk van de kenmerken waar men op richt, zoals chemische transformaties, structuur, stereochemie of functionele groepen. Voor een succesvolle totaalsynthese van een zeer complex molekuul is een nauwkeurige analyse op al deze niveaus noodzakelijk.

Het ginkgolide-B is een voorbeeld van een complexe verbinding die door Corey en zijn medewerkers is gesynthetiseerd. Deze complexe stof wordt gevonden in de ginkgoboom en geniet grote belangstelling omdat er diverse therapeutische eigenschappen aan toegeschre-

4. Het principe van de retrosynthese: a. Illustratie van enkele disconnecties die mogelijk zijn voor een 5,6-ringsysteem; de retrosynthetische analyse levert concurrerende routes op die uitgaan van een zesring-synthon (1), een vijf-ring-synthon (2) of een niet-cyclisch synthon (3). b. Retrosynthetische analyse van een zesringsstructuur.

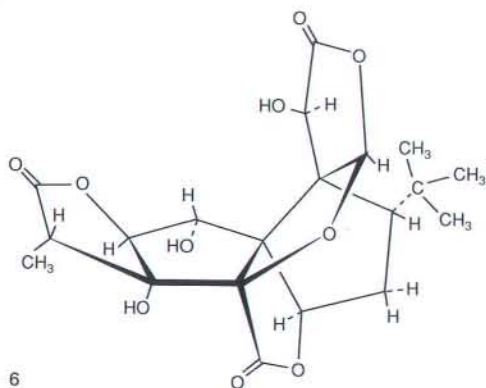






5. De Japanse noteboom (*Ginkgo biloba*) is een zogenaamd 'levend fossiel'. Het is de enige vertegenwoordiger van een plantenorde die zo'n 150 miljoen jaar geleden talrijk was. De ginkgoboom is in China en Japan aangeplant bij tempels en kan meer dan 1000 jaar oud worden. In de natuur is de soort waarschijnlijk al vele eeuwen uitgestorven. Deze bomen werden in de 18e eeuw als curiositeit naar Europa gebracht. Het eerste exemplaar dat in Europa werd aangeplant staat bij het Botanisch Laboratorium van de Rijksuniversiteit Utrecht.

5



6

6. Ginkgolide-B, een actieve stof uit de ginkgoboom, kon recent door Corey en medewerkers in 37 opeenvolgende chemische reacties uit cyclopentanon worden

gesynthetiseerd. De syntheseroute was gebaseerd op een nauwkeurige analyse van diverse retrosynthetische strategieën.

ven worden. Zo worden ginkgo-extracten in de traditionele Chinese geneeskunde gebruikt tegen astma en ontstekingen. Het molekuulskelet bestaat uit maar liefst zes vijftringen die op een unieke manier met elkaar verknoot zijn. Door verschillende retrosynthetische strategieën te analyseren, konden Corey en medewerkers een elegante route ontwikkelen waarbij ginkgolide-B uiteindelijk in 37 stappen volledig synthetisch uit cyclopentanon werd gemaakt (afb. 6).

De belangrijke verdienste van Corey's methode is de snelle en doelmatige manier waarop efficiënte syntheseroutes kunnen worden ontwikkeld. Bovendien geeft een retrosynthetische analyse vaak volkomen onverwachte routes waarvoor tot op dat moment geen synthetische methoden bekend waren. Dit heeft tot gevolg dat de beperkingen van de huidige metho-

den duidelijk worden en dat de ontwikkeling van nieuwe chemische reacties enorm gestimuleerd wordt. Tenslotte biedt een rationele retrosynthetische analyse de mogelijkheid computers te gebruiken om een syntheseroute te ontwerpen.

### Syntheseplanning per computer

Het gebruik van computeranalyses (LHASA) voor de synthese van complexe molekulen is al genoemd. Het computerprogramma analyseert een doelmolekuul op grond van fragmentstructuren, die in retrosynthetische analyses zelf weer dienen als doelmolekulen (afb. 9). Uitgaande van alle theoretisch mogelijke reacties die in het computergeheugen zijn opgeslagen, construeert het programma de nodige retrosynthesestappen (transforms). Op deze wijze wordt een *syntheseboom* gegenereerd. Vervolgens kan een chemicus op grond van verschillende criteria (opbrengst, beschikbaarheid grondstoffen, kosten enz.) routes schrappen. Uiteindelijk blijft de efficiëntste syntheseroute over.

Het gebruik van dergelijke computeranalyses kan een grote hulp zijn, aangezien bij een complex molekuul al snel miljoenen syntheseroutes mogelijk zijn. Het vinden van een efficiënte route is dan ook geen geringe uitdaging. Het LHASA-programma is ook in Nederland te gebruiken middels het CAOS/CAMM-centrum in Nijmegen.

7. In de nier liggen interstiële cellen dicht tegen tubuli en bloedvaatjes aan. Deze cellen produceren

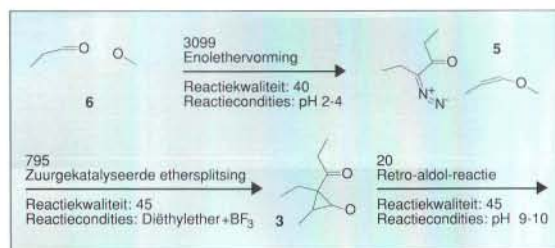
8. Een computerscherm toont de structuur van prostaglandine-E<sub>2</sub> in een kristal. Diverse prostaglandi-

9. In afbeelding 3 werd het programma LHASA gevraagd om syntheseroutes

onder andere prostaglandine-E<sub>2</sub>. Wellicht reguleren ze met deze stof de bloedstroom in het niermerg.

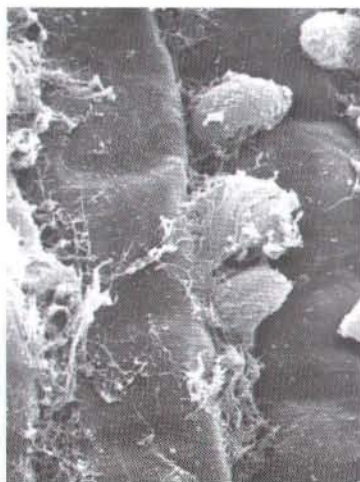
nen zijn sinds het einde van de jaren zestig door Corey en medewerkers gesynthetiseerd.

voor een gesubstitueerd cyclopentenon. Een van de oplossingen van de retro-

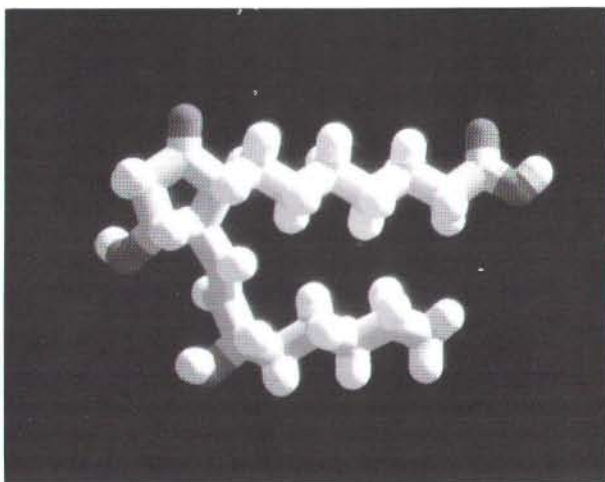


9

Corey's retrosynthetische benadering heeft geleid tot een geheel nieuwe manier van denken over de chemische synthese. Bovendien is daarmee de taak van de totaalsynthese van complexe molekulen een flink stuk lichter gemaakt. Retrosynthetische analyse en rationeel molekuulontwerp op basis van onafhankelijke en concurrerende synthestrategieën, vormen nu de basis voor de bereiding van velerlei biologisch actieve verbindingen, zoals nieuwe geneesmiddelen en landbouwchemicaliën.



7



8



synthese verschaftte dit reactievoorstel, waarbij de gevraagde verbinding in vijf stappen wordt ge-

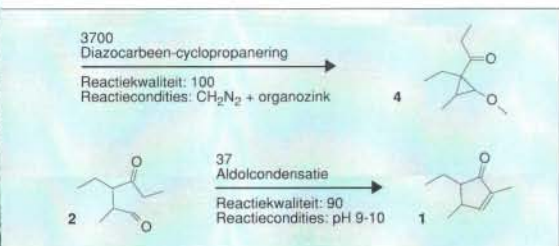
vormd. Met dit recept kan de chemicus in het organisch laboratorium aan de slag gaan.

10. Een belangrijk toepassingsgebied van de retrosynthese, eventueel toegepast in het programma LHASA, is het ontwerpen van syntheseroutes voor allerlei medicijnen. Dankzij de bijdrage van Corey aan

de organische chemie blijft veel onderzoekers het zoeken naar de naald in de hooiberg bespaard. De uiteindelijke organische synthese kan dan nog een moeizame klus blijken.



10



## Van theorie naar praktijk

We mogen echter niet uit het oog verliezen dat (theoretische) retrosynthetische analyse en synthese-ontwerp slechts voorlopers zijn van de 'echte' totaalsynthese. De synthese in het chemische laboratorium is dan vaak nog een lange, zware weg. De grote verdienste van Corey is ongetwijfeld de daadwerkelijke toepassing van zijn benaderingen in de bereiding van een scala aan complexe natuurstoffen zoals triterpenen, sesquiterpenen, alkaloiden, antibiotica en hormonen.

Mijlpalen in zijn synthetisch oeuvre zijn ondermeer de totaalsyntheses van verbindingen die in de natuur uit arachidonzuur worden gevormd, zoals prostaglandinen. Deze stoffen zijn van groot belang bij allerlei processen in het menselijk lichaam, onder andere bij bloedstolling en allergie. Corey's naam is verder synoniem voor een enorm aantal nieuwe synthetische methoden en reagentia. Typerend voor zijn onderzoek is dat hij stappen in een syntheseroute waarvoor geen reacties bekend zijn, niet uit de weg gaat maar juist geheel nieuwe reagentia ontwikkelt.

De laatste tijd trekt ook zijn onderzoek aan asymmetrische katalysatoren de aandacht. Deze verbindingen, door Corey chemzymen gedoopt, tonen hoge selectiviteit in de bereiding van zuivere spiegelbeeldvormen van mole-

kulen. Het is dan ook niet zo verwonderlijk dat Corey bij een symposium ter gelegenheid van zijn 60ste verjaardag betiteld werd als waarschijnlijk de meest produktieve organisch-chemicus in de wereld. Als geen ander illustreerde hij de afgelopen jaren de kracht van de organische synthese bij de bereiding van complexe natuurstoffen of synthese van geheel nieuwe molekulen met bijzondere eigenschappen.

Corey zelf geeft het belang van zijn vakgebied in de inleiding van zijn zojuist verschenen boek *The logic of chemical synthesis* als volgt aan: "Synthesis remains a dynamic and central area of chemistry".

## Literatuur

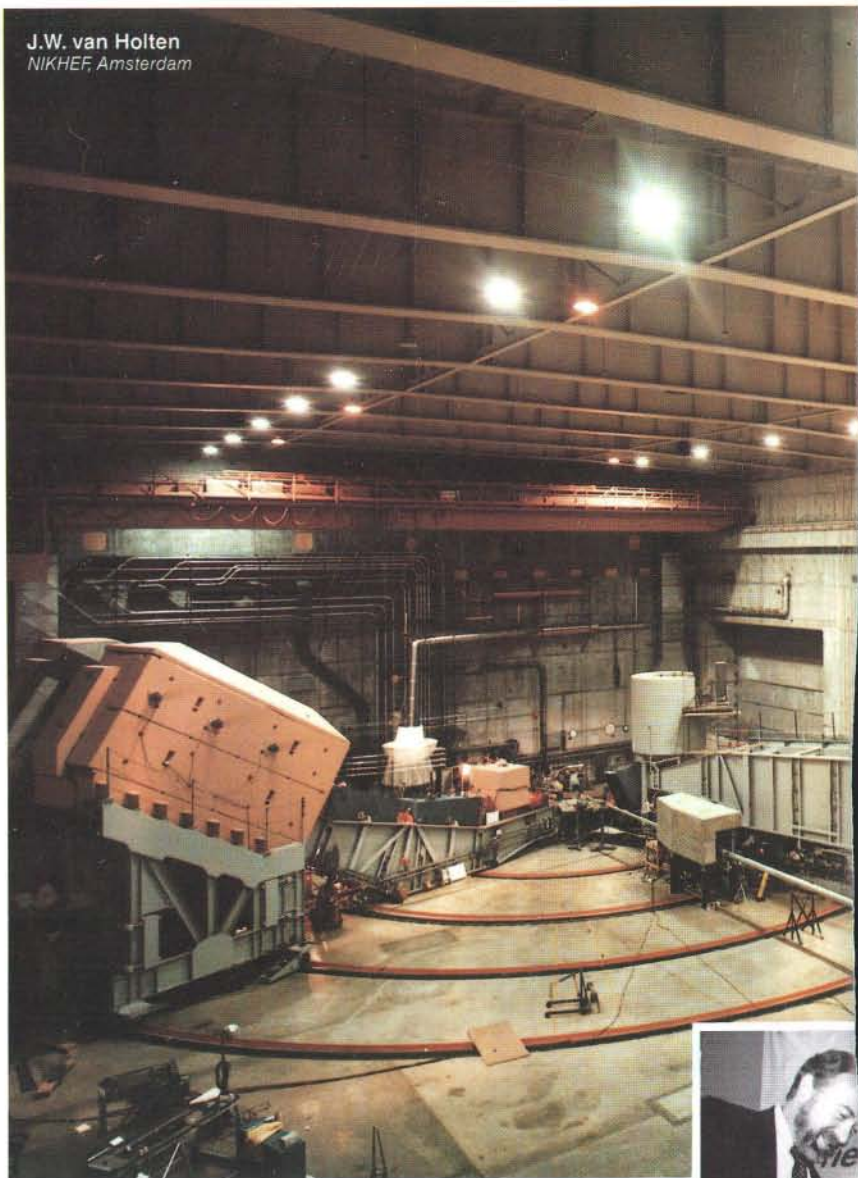
- Corey EJ, Cheng X-M. *The Logic of Chemical Synthesis*. New York, John Wiley, 1989.  
Ottenheijm HCJ. *Computer Assisted Organic Synthesis*. Janssen Chimica Acta 1984; 3, 3.

## Bronnen van illustraties

- CAOS/CAMM-centrum, KUN: pag. 832-833, 1, 3, 8, 9.  
Rick Friedman, Black Star/Transworld, Haarlem: pag. 832.  
Proefstation voor de bloemteelt, Aalsmeer: 1.  
Janssen Pharmaceutica, Beerse: 2.  
P.J.M. van der Aart, Faculteit Biologie, RUU: 5.  
Uit: Kessel RG, Kardon RH. *Cellen, weefsels en organen*. Maastricht-Brussel: Natuur & Techniek, 1983: 7.  
Duphar BV, Weesp: 10.  
De overige afbeeldingen zijn afkomstig van de auteurs.

# VERRASSENDE VERSTROOIING

J.W. van Holten  
NIKHEF, Amsterdam



Na 22 jaar krijgen Jerome Friedman, Richard Taylor en Henry Kendall (v.l.n.r.) uiteindelijk de Nobelprijs voor de natuurkunde voor hun onderzoek aan de nucleonen. Aan het einde van de drie kilometer lange, lineaire versneller in Stanford maten zij de verstrooiing van elektronen aan nucleonen. Enorme detectoren dienden de hoeken te registreren waarover de elektronen werden verstrooid.

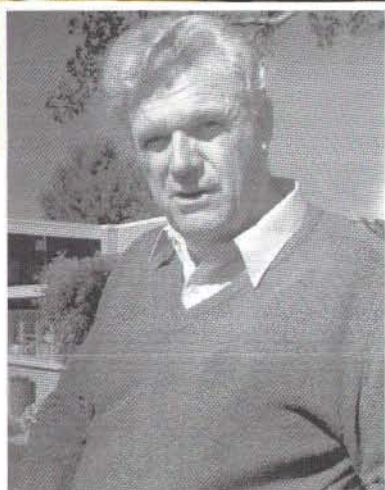


Nobelprijs natuurkunde 1990





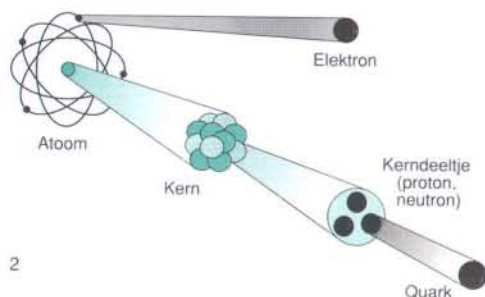
De Nobelprijs voor natuurkunde is dit jaar toegekend aan de Amerikanen Jerome I. Friedman en Henry W. Kendall, beiden verbonden aan het Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, VS, en de uit Canada afkomstige Richard E. Taylor van de universiteit van Stanford, VS. Zij krijgen de prijs voor experimenten die zij in 1967 en 1968 op het elektronen-versnellerlaboratorium SLAC in Stanford hebben uitgevoerd. Zij bestudeerden er botsingen tussen elektronen en kerndeeltjes om zo meer te weten te komen over de eigenschappen van kerndeeltjes.



De experimenten waarvoor Jerome Friedman, Henry Kendall en Richard Taylor 22 jaar na dato de Nobelprijs krijgen, toonden aan dat er in de kerndeeltjes nog kleinere puntvormige objecten voorkomen. Die werden aangeduid met de term *partonen*. De meest prominente van deze partonen bleken in eigenschappen overeen te komen met de *quarks*, waarvan het bestaan op theoretische gronden al een aantal jaren eerder was gesuggereerd door Gell-Mann, Nobelprijswinnaar in 1969, en Zweig.

## De atoomkern

In 1911 ontdekte Ernest Rutherford dat de materie in atomen niet gelijkmatig is verdeeld: in het midden van een atoom bevindt zich een zware, elektrisch positief geladen kern en daaromheen bewegen lichte, negatief geladen elektronen. Rutherford baseerde zijn ontdekking op experimenten waarbij een bundel alfadeeltjes (zoals we nu weten de positief geladen kernen van heliumatomen) op een metaalfolie werd gericht. De meeste alfadeeltjes vlogen dwars door het folie, maar sommigen werden onder een grote hoek afgebogen, of keerden zelfs van richting om. Deze uitkomsten wezen erop, dat er binnen in de metaalatomen een kleine maar harde kern zat waaraan de alfadeeltjes bij botsing verstrooiden. Door de kleine afmeting van de kern in vergelijking met die van het gehele atoom, vlogen de meeste alfadeeltjes echter gewoon rechtdoor zonder een kern te raken.



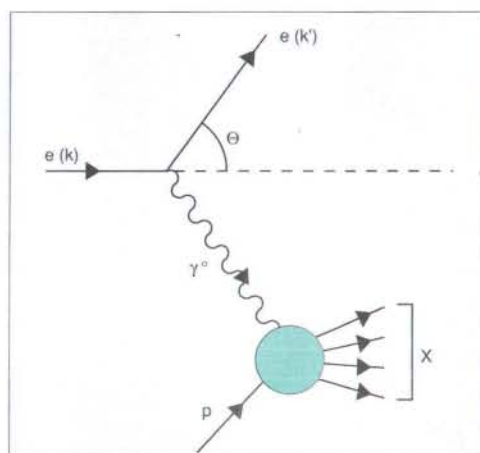
2. Het beeld dat de fysicus heeft van het atoom, is binnen een tijdsbestek van slechts zestig jaar nogal aan verandering onderhevig geweest. Dit simpele schema illustreert in feite

een enorme technische en wetenschappelijke ontwikkeling. Ooit beschouwde men het atoom als een volstrekt ondeelbaar, kleinste deel van een chemisch element.

Gedurende de jaren twintig en dertig van deze eeuw werd het langzamerhand duidelijk dat de kern geen simpel object is, maar zelf uit kleinere bouwstenen bestaat: de kerndeeltjes of *nucleonen*. Eén van die nucleonen is een deeltje met een positieve elektrische lading, het proton. Dit verklaart de positieve kernlading. In zijn eentje vormt het proton de kern van het lichtste atoom, waterstof. In alle andere kernen



1



3



komen naast protonen ook ongeladen deeltjes voor met vrijwel dezelfde massa: neutronen, die in 1932 door de Engelsman Chadwick (Nobelprijswinnaar in 1935) werden ontdekt.

Als vrij deeltje is het neutron niet stabiel. Na gemiddeld een kwartier valt het radioactief uiteen in een proton, een elektron en een ongeladen, praktisch massaloos deeltje, het neutrino. Gebonden in een atoomkern kan het neutron

werd het mogelijk de structuur van kernen te bepalen door er zeer energetische elektronen aan te verstrooien. Uit het verstrooiingspatroon kan men dan bij voorbeeld de verdeling afleiden van elektrische lading of van magnetisatie in de kern.

Een groep fysici onder aanvoering van Robert Hofstadter (Nobelprijswinnaar in 1961) onderzocht met behulp van dit instrument de structuur van de twee eenvoudigste kernen: waterstof en deuterium. Tot hun verbazing vonden ze, dat het proton in waterstof zich niet gedraagt als een puntvormig deeltje, maar eerder als een bolletje met een regelmatig verdeelde elektrische lading en een straal van ongeveer  $10^{-15}$  meter. Door vervolgens de verstrooiing aan een enkel proton te vergelijken met die aan een deuteriumkern, konden de onderzoekers vaststellen dat het neutron een vergelijkbare uitgebreidheid bezit. Het neutron heeft weliswaar geen netto elektrische lading, maar er bleken binnen het neutron wel gelijke hoeveelheden positieve en negatieve lading aanwezig te zijn. In samenhang daarmee is het neutron bovendien magnetisch. Zo ontstaat er tussen het neutron en het elektron een interactie die voldoende is om elektronenverstrooiing tot stand te brengen.

### Elastisch en inelastisch

In de fysica onderscheidt men twee soorten botsingsprocessen. Bij elastische verstrooiing van deeltjes verandert wel hun bewegingstoestand, maar de deeltjes zelf komen ongeschonden uit de botsing tevoorschijn. In zo'n elastische botsing gedragen ze zich als biljartballen; de wetten van energie- en impulsbehoud zorgen er dan voor dat bij een bepaalde energie van de inkomende deeltjes en een bepaalde verstrooiingshoek, de snelheid (en energie) van de uitgaande deeltjes volledig vaststaat.

Behalve elastische botsingen kennen we ook inelastische botsingen. Een goed voorbeeld daarvan is een auto die een lantarenpaal ramt. Het wezenlijke van inelastische verstrooiing is, dat een deel van de botsingsenergie wordt omgezet in inwendige energie of wordt gebruikt voor het maken van nieuwe deeltjes. Er blijft dan minder energie over om aan de uitgaande deeltjes mee te geven in de vorm van beweging. Bij inelastische elektron-nucleonverstrooiing kan een proton bij voorbeeld overgaan in een

1. Een luchtfoto van het SLAC toont de drie kilometer lange versneller, waarin elektronen uiteindelijk een energie van 20 GeV verkrijgen. Verstrooiing van deze elektronen aan kerndeeltjes leverde het bewijs dat protonen en neutronen zijn opgebouwd uit kleinere bouwstenen. De enorme energie van de elektronen bleek echter niet toereikend te zijn voor het losmaken van deze bouwstenen uit de nucleonen.

3. Inelastische verstrooiing van een elektron aan een proton. Een elektron met impuls  $k$  wordt onder een hoek  $\theta$  verstrooid en komt er met impuls  $k'$  uit. Het golflijntje stelt een foton voor, dat de elektromagnetische wisselwerking tussen het elektron en het proton tot stand brengt.

echter wel stabiel zijn. Het eenvoudigste voorbeeld van een stabiele kern met een neutron is de kern van zware waterstof (deuterium), die bestaat uit een proton en een neutron. Zware waterstof heeft dezelfde chemische eigenschappen als gewone waterstof, maar is bijna twee keer zo zwaar door de aanwezigheid van het neutron in de atoomkern.

### Elektron-nucleonverstrooiing

In de jaren vijftig kwam in Stanford (Californië) een nieuw instrument ter beschikking voor het onderzoek van atoomkernen: een lineaire versneller die elektronen leverde met een energie van 1 GeV ( $10^9$  elektronvolt). Daarmee



neutron plus een geladen pion. In zo'n geval zal het uitgaande elektron bij een bepaalde hoek daarom een geringere snelheid hebben dan bij elastische verstrooiing. Inelastische verstrooiing is van belang omdat het informatie levert over de inwendige structuur van een voorwerp.

### Diep-inelastische verstrooiing

Bij het experiment van Hofstadter bleek alleen elastische verstrooiing op te treden. De verstrooiing gaf geen enkele aanwijzing over een mogelijk inwendige structuur van de kerndeeltjes. Integendeel, het leken tamelijk homogene en diffuse objecten. Toen in de jaren zestig in Stanford een nieuwe versneller in gebruik werd gesteld die tot twintig keer zo veel energie per elektron leverde, beschouwden sommigen het doen van een elektron-nucleon-verstrooiings-experiment dan ook als tamelijk oninteressant. De hoge elektronenenergie maakte het wel mogelijk dieper dan ooit te voren in het nucleon door te dringen, maar niets wees erop dat daar iets te vinden zou zijn. Friedman, Kendall en Taylor en hun medeonderzoekers lieten zich door dit soort overwegingen niet weerhouden. Zij richtten hun aandacht in het bijzonder op de inelastische verstrooiingsprocessen:

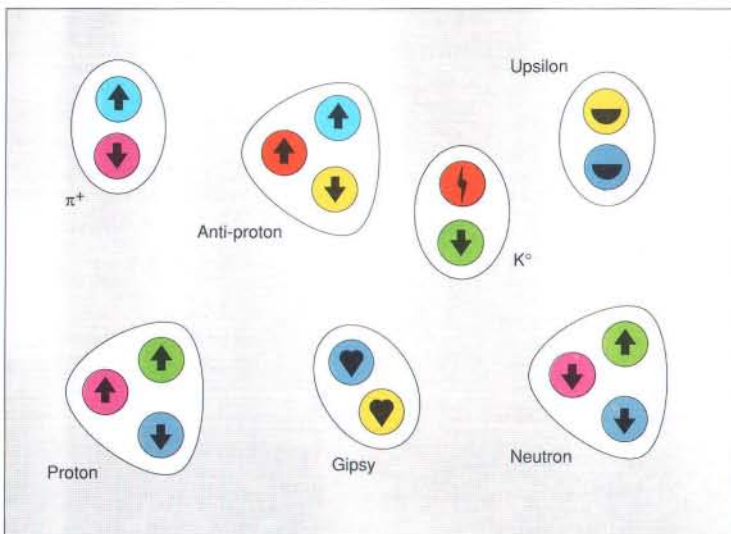
elektron + proton  $\rightarrow$  elektron + X,

4. Een blik op de PIA-deeltjesopslagring van DESY, het Duitse deeltjesfysicallaboratorium in Hamburg. PIA staat voor 'Positron Intensity Accumulator'. Positronen (of anti-elektronen) worden in dit apparaat opgeslagen. Onderzoek met versnellers heeft ons veel geleerd over het gedrag van de, door Friedman, Taylor en Kendall ontdekte, quarks en andere subatomaire deeltjes.

5. Men stelt zich voor dat de diverse subatomaire deeltjes zijn opgebouwd uit quarks (b). Er zijn zes verschillende quarks die elk in drie 'kleuren' - rood, blauw en groen - kunnen voorkomen. Combinatie van de kleuren die binnen een deeltje voorkomen, levert de kleur 'wit'. Naast de quarks bestaan er ook anti-quarks. Deze geeft men weer met de complementaire kleuren. De kleuren van de antiquarks in een deeltje combineren eveneens tot de kleur wit (b). De quarks zijn aan elkaar gelijmd door middel van gluonen, die volgens het model twee kleuren hebben. Als men twee quarks van elkaar probeert te scheiden, ontstaat er een lange keten van gluonen. Dankzij de gluonen zijn de quarks (nog) niet afzonderlijk waarneembaar (c).



4

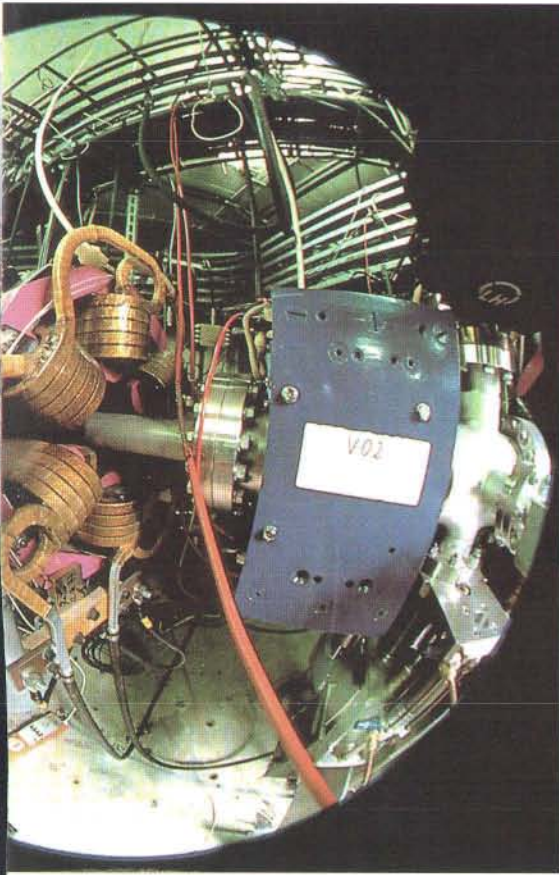


5a



5b





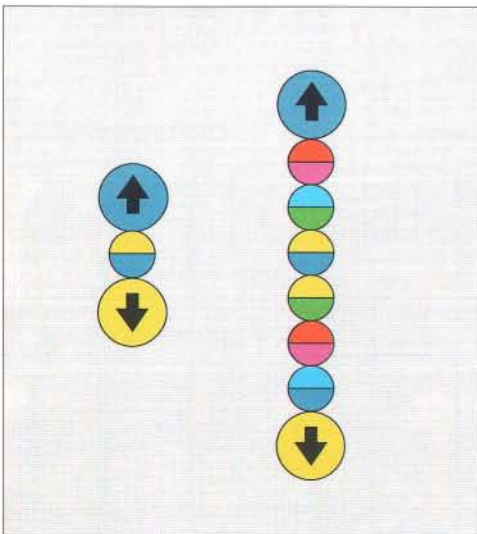
waarbij X van alles zijn kan. Op zijn minst zouden deze processen enige informatie over zo genaamde resonanties van het proton of het neutron opleveren. Het bestaan van zulke resonanties, een soort aangeslagen toestanden van de nucleonen, was al langer bekend.

Het resultaat van het diep-inelastische verstrooiingsexperiment was ronduit verbluffend: de elektronen bleken wel dertig keer zo vaak over grote hoeken te worden verstrooid als op grond van een diffuse structuur van het nucleon mocht worden verwacht. Net als in het geval van Rutherfords alfadeeltjes in het atoom, bleken de elektronen binnen het nucleon harde kernen aan te treffen; alleen ging het dit keer niet om een enkele centrale kern, maar om een aantal min of meer gelijke, puntvormige verstrooiingscentra. Deze werden voorlopig partonen gedoopt.

### De quarkhypothese

De theoretische beschrijving van de verstrooiing van elektronen aan partonen in een nucleon, werd uitgewerkt door Feynman (Nobelprijs 1965), Bjorken en Paschos. Met hun methode kon uit de experimentele gegevens worden afgeleid dat de partonen voor het merendeel deeltjes waren met dezelfde spin (hoeveelheid draaiing) als elektronen. Aangezien er drie van die partonen in ieder nucleon voorkwamen, moesten deze een elektrische lading dragen die  $2/3$ , respectievelijk  $-1/3$  van die van het proton bedroeg. Deeltjes met zulke eigenschappen waren op heel andere gronden al in 1964 gepostuleerd door Gell-Mann en Zweig.

Uit observaties van kosmische straling en uit experimenten bij grote protonversnellers bleek in de jaren vijftig en zestig dat er tientallen tot dan toe onbekende deeltjes bestonden. De meesten daarvan behoren tot de zogenaamde hadronen; dit zijn kortlevende, zware deeltjes die verwant zijn aan de kerndeeltjes. Om enige systematiek aan te kunnen brengen in de lange lijsten van hadronische deeltjes, opperden Gell-Mann en Zweig dat alle hadronen zijn opgebouwd uit een klein aantal fundamentele bouwstenen die kunnen voorkomen in verschillende combinaties, zoals atomen zijn opgebouwd uit verschillende combinaties van elektronen en nucleonen. Deze bouwstenen werden 'quarks' genoemd. Maar hoewel het schema van de opbouw van hadronen in ter-



5c



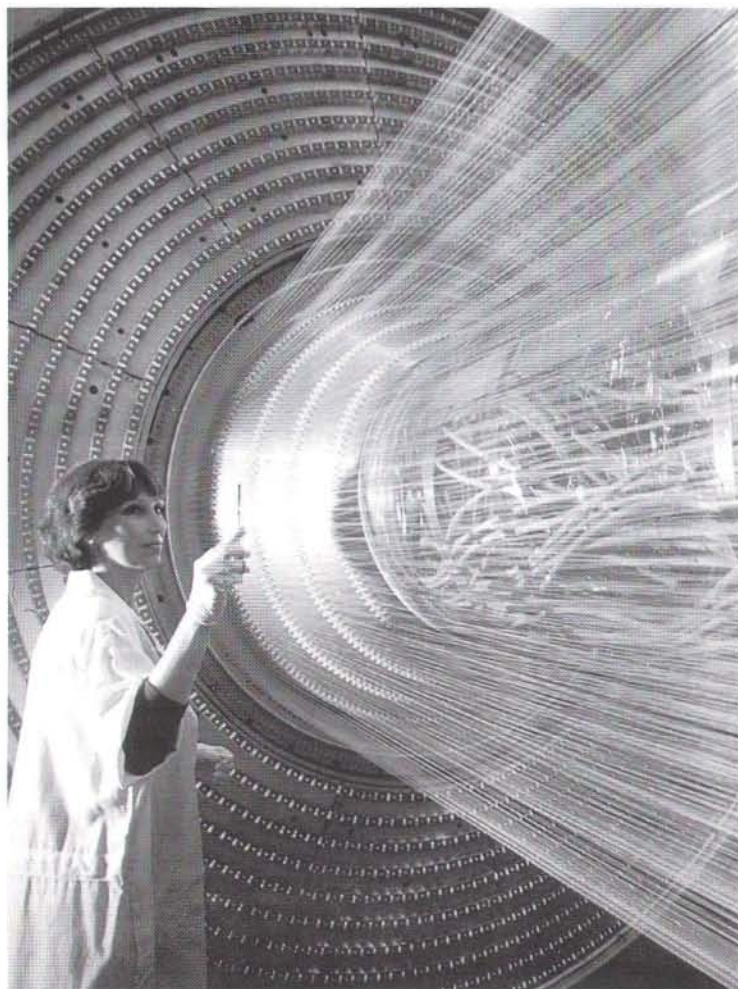
men van quarks een goede verklaring vormde voor de verscheidenheid aan dergelijke deeltjes, werd ondanks vele inspanningen nooit een quark waargenomen. Daarom werd de quark-hypothese door vele fysici niet zo serieus genomen.

### Kernkrachten en gluonen

Door het onderzoek van de Nobelprijswinnaars van dit jaar, Friedman, Kendall en Taylor, won het quarkmodel zeer aan geloofwaardigheid. Het voornaamste obstakel dat volledige acceptatie in de weg stond, was de onmogelijkheid om de partonen uit de kerndeeltjes vrij te

maken en in isolatie te kunnen bestuderen. Pas in de loop van de jaren zeventig werd duidelijk dat dit met een fundamentele eigenschap van de sterke kernkrachten samenhangt.

De kracht die de quarks in een proton of neutron bijeenhoudt, staat om historische redenen bekend als 'kleurkracht'. Deze kan men, evenals de elektromagnetische kracht en de zwaartekracht, beschrijven met behulp van een veld, dat in dit geval het 'kleurveld' wordt genoemd. Een quantummechanische beschrijving van de kleurkrachten is noodzakelijk, en zoals de quanta van het elektromagnetische veld fotonen worden genoemd, zo heten de quanta van het kleurveld *gluonen*. Gluonen zijn nodig om



6. In Stanford ontwikkelde men later deze draaddetector. Na een botsing van zeer energetische deeltjes ontstaan onder andere ioniserende deeltjes die een spoor achterlaten. De draden vangen de elektronen die deze deeltjes vrijmaken. Uit dit spoor leiden natuurkundigen richting, energie en karakter van de ontstane deeltjes af. Deze Mark II detector staat momenteel opgesteld in Hamburg.

7. Vergeleken met de huidige apparatuur, ziet deze lineaire versneller die Kendall, Taylor en Friedman gebruikten voor hun experimenten er primitief uit. De hoge-energie-fysica is een onderzoeksgebied dat zich met rasse schreden steeds verder ontwikkeld.

8. Deze grafiek geeft de kans weer dat elektronen een bepaalde energie hebben na botsing met een proton onder een hoek van  $10^\circ$  met een energie van 4,879 GeV. De pieken in de grafiek wijzen op de vorming van een of meer nieuwe deeltjes bij bepaalde energiewaarden. Bij een elastische botsing behouden de elektronen een energie van ruim 4,5 GeV.



quarks bijeen te houden en komen daarom ook voor in de kerndeeltjes. Een deel van de partonstructuur van nucleonen moet dan ook worden toegeschreven aan de gluonen. Deze verfijning van het partonmodel bleek goed overeen te stemmen met de experimentele resultaten.

De theorie van de kleurkrachten werd pas in de jaren zeventig ontwikkeld. Een van de meest verrassende uitkomsten van deze theorie is, dat de kleurkrachten zwak zijn zolang de quarks en/of gluonen dicht in elkaars buurt zijn, maar sterker worden als men probeert ze uit elkaar te trekken. Het is alsof ze door een veer met elkaar zijn verbonden; hoe verder de veer wordt uitgerekt, des te sterker de kracht die ze weer naar el-

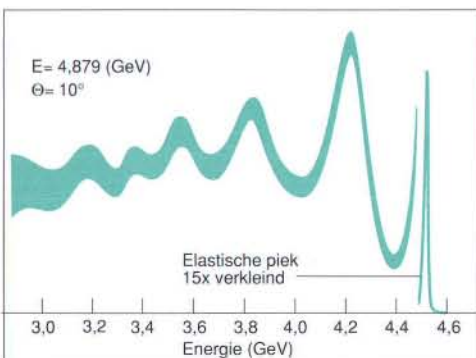
kaar toe drijft. Deze eigenschap van de kleurkrachten leidt tot de voorstelling dat kleurgevoelige deeltjes (quarks en gluonen) permanent opgesloten zitten in *hadronische materie* en er niet uit los kunnen komen. Dit verklaart dan waarom ze wel als partonen in het inwendige van een proton of neutron gezien kunnen worden, maar niet als vrije deeltjes in de natuur.

### Tot slot

Het quark-gluon-model van de hadronische materie, dat ook bekend staat als de *quantumchromodynamica*, is zeer succesvol gebleken in het begrijpen van de substructuur van kerndeeltjes en hun vele verwanten. De experimentele basis voor dit succes is voor een belangrijk deel gelegd door de diep-inelastische verstrooiingsexperimenten van Friedman, Kendall en Taylor. Omdat de theorie van de sterke kleurkrachten pas in de jaren erna tot ontwikkeling kwam, heeft het enige tijd geduurd voor het fundamenteel belang van deze experimenten algemeen werd ingezien. Na 22 jaar heeft het van het Nobelcomité uiteindelijk erkenning gekregen.



7



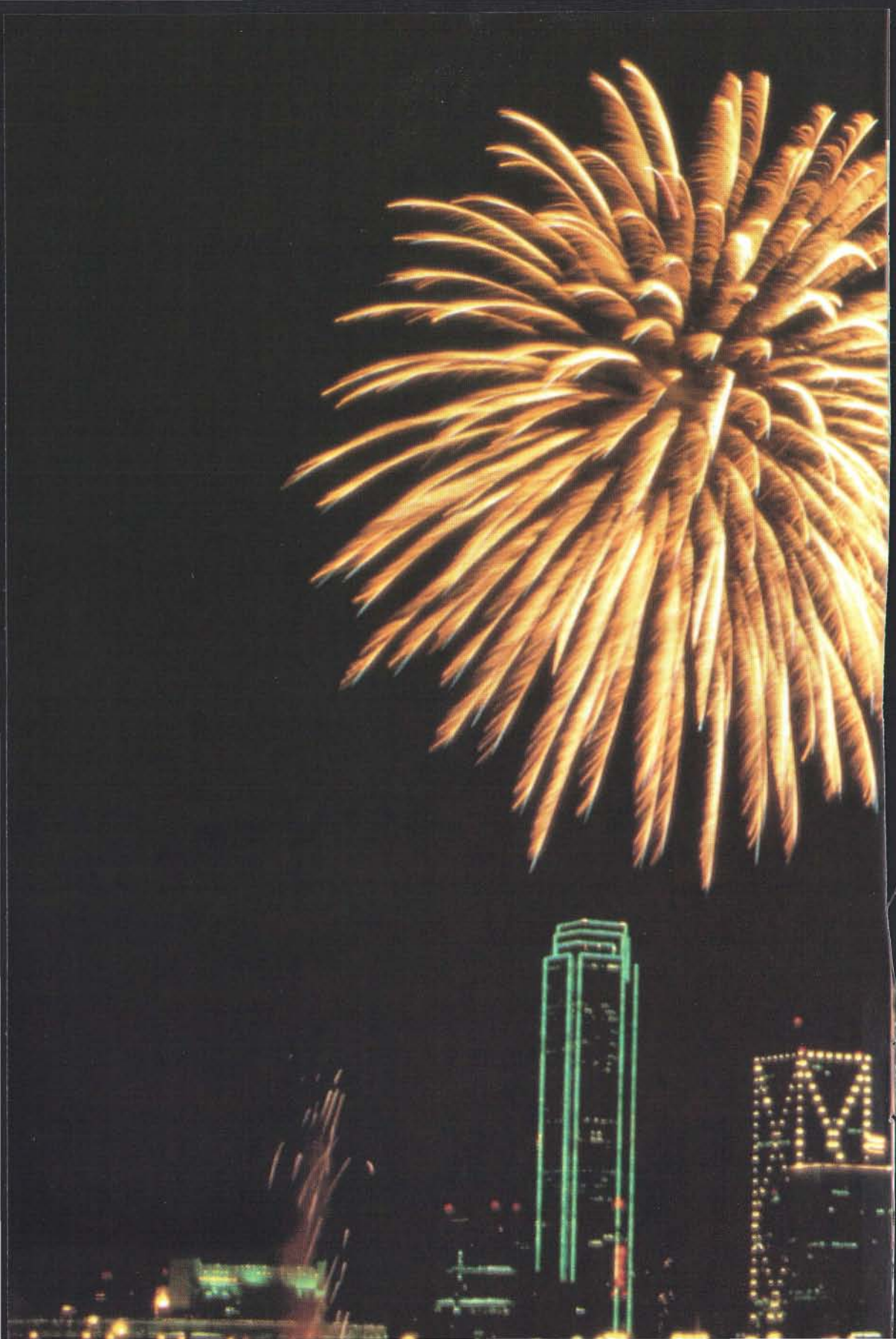
8

### Literatuur

Kunne RA. De sterke kernkracht. *Natuur & Techniek* 1987; 55: 8, 666-679.  
Raad B de. Leptonen in de LEP - Grensoverschrijdende experimenten. *Natuur & Techniek* 1989; 57: 8, 510-521.

### Bronnen van illustraties

SLAC, Stanford: pag. 840-841, 1, 7.  
AP: pag. 841.  
ANP: pag. 840 (zwart-wit).  
Science Photo Library/Joël, Amsterdam: 4, 6.  
De overige afbeeldingen zijn afkomstig van de auteurs.







# EXPLOSIECHEMIE

## KRUIT EN KNEED BOM

Eén deel zwavel, twee delen houtskool en zes delen salpeter. Dat was al in de dertiende eeuw het recept voor buskruit. Weinig chemische reacties hebben de loop van de geschiedenis zo sterk beïnvloed als de explosie van buskruit. In de loop der eeuwen is het gebruik van explosieven sterk toegenomen. Buskruit is verdrongen door andere springstoffen, zoals dynamiet en kneedbommen. Het aantal toepassingen daarvan, vreedzame en minder vreedzame, groeit nog steeds. Telkens ligt een chemische reactie ten grondslag aan de knal en de energie-explosie.

Gerard Stout  
*Ten Boer*

Wanneer, waar en door wie het buskruit is uitgevonden is onduidelijk. Afwisselend voeren historici Chinezen, Arabieren en Bengalen op als uitvinders van het poeder. Waarschijnlijk wisten de Chinezen al rond het begin van onze jaartelling hoe ze buskruit moesten maken. In elk geval beschikten zij tijdens de Han-dynastie (25-250 na Chr.) over een wetenschappelijke encyclopedie, de *Shen-ning pents'ao-ching*, die melding maakte van zwavel en salpeter, de belangrijkste ingrediënten van buskruit.

In het noorden van China werd salpeter gevonden. De staat had het alleenrecht op de winning en verkoop van dit mineraal. Ook zwavel komt in de natuur voor en de produktie van (houts)kool was al lang bekend. De Chinezen hebben buskruit vooral voor vreedzame doeleinden gebruikt. Niet alleen om zich te amuseren; ook tijdens begrafenissen werd ter ere van de overledene vuurwerk ontstoken. Nadat de Chinezen rond het jaar 1000 de vuurpijl hadden uitgevonden, gebruikten zij ook vuurwerk om vijanden af te schrikken.

In Europa wordt eerst in 1280 over de samenstelling van buskruit geschreven. De geestelijke en alchemist Albertus Magnus en de Engelse monnik Roger Bacon gaven er recepten van. Bacon beheerste de Arabische taal, wellicht verkreeg hij zijn kennis uit het Midden Oosten. De Chinese encyclopedie *Tien kung k'ai wu* meldt dat Hollanders rond 1300 de kennis over de samenstelling van buskruit naar Europa hebben gebracht. Hoe de precieze overlevering ook is gebeurd, duidelijk is dat er na 1300 maar weinig oorlogen zijn gevoerd waarin buskruit geen grote rol speelde.

### Zwavel, berken en urine

Aan zwavel en houtskool was in Europa gemakkelijk te komen. Salpeter (kaliumnitraat,  $\text{KNO}_3$ ) moest aanvankelijk uit India worden ingevoerd. Het was schaars en dus duur. De ontdekking dat met de as van berkenhout (potas) uit urine kaliumnitraat kon worden gewonnen, betekende in dit opzicht een hele vooruitgang.

(Potas bevat veel kaliumverbindingen. De Engelse naam potassium voor kalium herinnert daar nog aan.)

Aan het eind van de vorige eeuw werd Chili een belangrijke nitraatleverancier. Het daar gevonden natriumnitraat is niet zo geschikt voor

kruit — het trekt te gemakkelijk water aan. Door een eenvoudige reactie met kaliumchloride is het gewenste kaliumnitraat te verkrijgen. Uit een geconcentreerde oplossing van natriumnitraat en kaliumchloride kristalliseert natriumchloride als eerste zout uit. Na filtratie en indampen van de oplossing blijft het kaliumnitraat over.

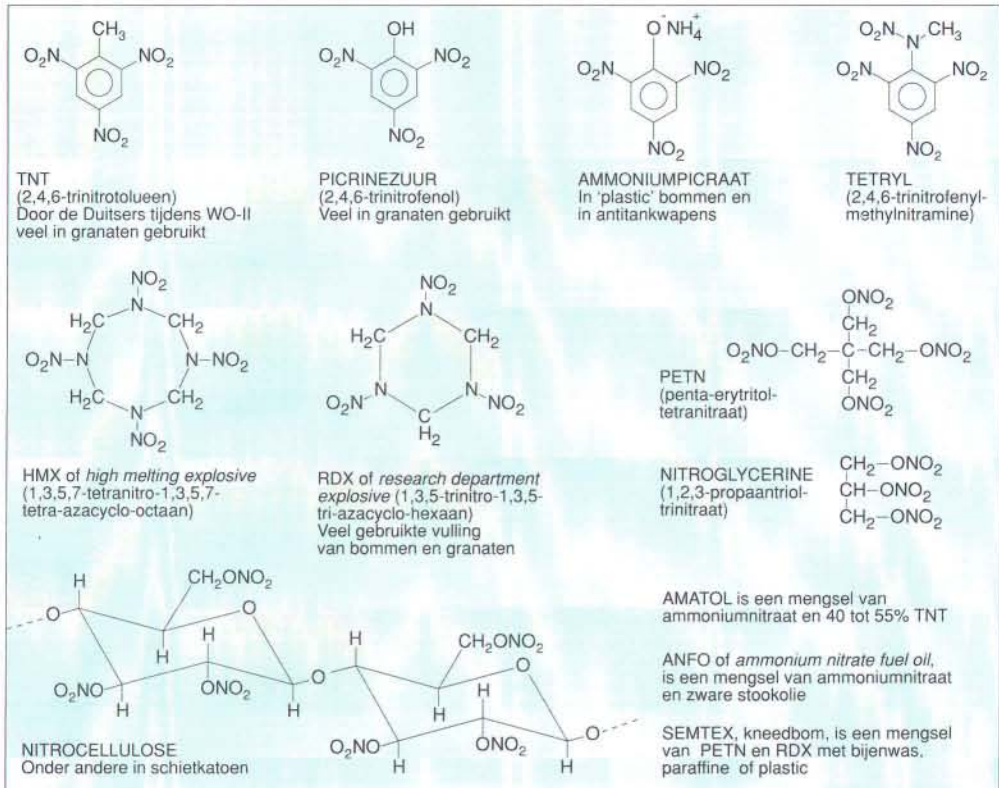
De Duitsers Fritz Haber en Carl Bosch slagen er kort voor de Eerste Wereldoorlog in om ammoniak te produceren uit de stikstof uit de lucht. Als zij aldus een nieuwe, goedkope bron van nitraten aanboren, heeft het buskruit z'n belangrijkste tijd al gehad. De nitraten blijven echter het belangrijkste bestanddeel van explosieven, en zijn dat nu nog.

### Zuurstof, brandstof en energie

Explosieven zijn mengsels van oxydatiemiddelen en reductiemiddelen. De oxydator — de zuurstofleverancier — is meestal een nitraat, maar chloraten en peroxyden worden ook gebruikt. De reductiemiddelen of brandstoffen zijn metaalpoeders zoals ijzer en aluminium of niet-metalen als zwavel en koolstof. In de meeste hedendaagse springstoffen zijn oxydator en reductor in één molecuul verenigd. Dat is dan meestal een genitreerd koolwaterstof, zoals in nitroglycerine (1,2,3-propaantrioltrinitraat). De nitraatgroepen fungeren daar als leverancier van zuurstof en de glycerylgroep als brandstof. 'Plastic' springstoffen, die ook bekendstaan als kneedbommen, en andere moderne explosieven zijn meestal gebaseerd op genitreerde aromaten of andere cyclische kool-







1. Explosieven zijn er in allerlei vormen, met elk hun eigen eigenschappen. Het zijn echter steeds 'mengsels' van een brandstof en een oxydator, vaak gecombineerd in één molecuul.

2 en 3. Hoekige RDX-kristallen (2) kunnen mechanisch worden vervormd tot ronde (3). Bij toepassing in plastic-explosieven is het ronde RDX veel minder schokgevoelig.



3

stofverbindingen. Soms wordt er extra zuurstof bij gemengd in de vorm van ammoniumperchloraat.

Om een explosief tot ontploffing te brengen, moet er energie aan worden toegevoegd. Voor sommige springstoffen is maar heel weinig energie nodig, een lichte schok of een korte verhitting volstaat. Andere komen daarentegen pas tot ontploffing tengevolge van de schokgolf van een eerdere explosie. We noemen dat *secundaire* explosieven. Kneedbommen zijn een voorbeeld van secundaire explosieven; na ontsteking brengt een kleine lading *primair* explosief ze tot ontploffing.

De klassieke wijze van ontsteking is die met een brandende lont. Een lont bestaat veelal uit een katoenen draad die verzadigd is met een explosief mengsel. Het 'lopend vuurtje' bereikt na verloop van tijd de springlading, die daarop explodeert. Een elektrische (vonk)ontsteking is ook mogelijk. In westernfilms wordt deze ontsteking veelal uitgevoerd door een cowboy



4

die een staaf in een kistje drukt. In de kist bevindt zich een dynamo. De (getande) staaf laat de dynamo draaien en de opgewekte stroom laadt een condensator op. Als de punt van de staaf een metalen plaat op de bodem van de kist bereikt treedt er kortsluiting op in het circuit en ontlaaft de condensator zich via een gloeidraad of een vonkoverslag. De hitte daarvan zorgt voor de ontbranding van het explosief.

In 1863 deed Alfred Nobel zijn eerste en wellicht belangrijkste ontdekking, namelijk die van het slaghoedje. Tot die tijd was de ontsteking van explosieven een gevaarlijke en onbetrouwbare aangelegenheid die veel slachtoffers maakte. De ontsteking van Nobel bestond uit een koperen kapje gevuld met het hoogst

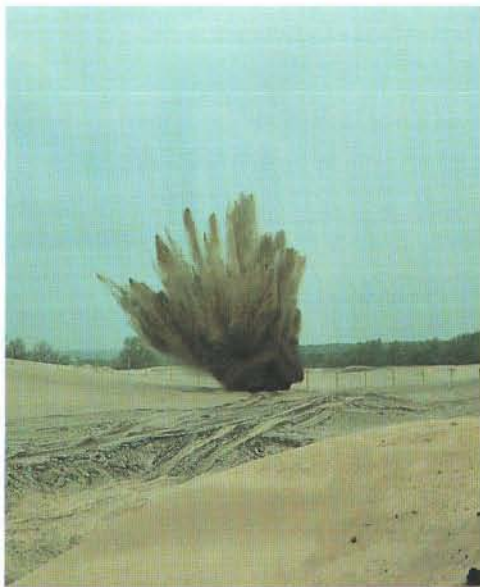
4. De temperatuur loopt tijdens de buskruitontploffing in vuurwerk zo hoog op, dat de in het kruit verwerkte metalen voor prachtige kleuren zorgen. Magnesium of aluminium geeft wit licht, strontiumverbindingen zorgen voor rood licht en vonken met koperverbindingen lichten blauw op.

5 en 6. Het Explosieven Opruimings Commando maakt bommen onschadelijk door de ontsteking en de hoofdclading van elkaar te scheiden. Bij deze Engelse 500-ponder uit WO II (5), is dat gedaan met een mechanische klemplaat, die de ontsteking uit de bom getrokken heeft. Voor hardnekkige ontstekers heeft het commando de beschikking over methoden waarbij de kracht van een ontploffing de ontsteker wegrukt. De hoofdclading wordt op een veilige plaats weggevoerd (6).



5





6

explosieve kwikfulminaat ( $C=N-O-Hg-O-N=C$ ). Met de schokgolf van het ontploffende kwikfulminaat, kon hij nitroglycerine veilig ontsteken.

Na ontsteking kunnen er twee processen optreden: *deflagratie* en *detonatie*. Bij de ontplofing van buskruit is er sprake van een deflagratie; de voortplantingssnelheid van de exotherme reactie door het mengsel is kleiner dan of ongeveer even groot als de geluidssnelheid ( $330 \text{ m.s}^{-1}$ ). Bij een detonatie ontstaat er een schokgolf, waarvan de voortplantingssnelheid veel groter is dan de geluidssnelheid (tot  $10\,000 \text{ m.s}^{-1}$ ). Het effect van een detonatie is dan ook veel groter dan van een deflagratie.

### Vuurwerk

Buskruit wordt tegenwoordig nog maar weinig gebruikt. Er zijn andere mengsels en verbindingen die betrouwbaarder en effectiever zijn. Toch werd er tijdens de Eerste Wereldoorlog nog ruim een miljoen ton van het zwavel-houtskool-salpetermengsel verschoten. Vandaag de dag vindt buskruit zijn voornaamste toepassing in feestvuurwerk. Het vuurwerkkruit heet in vaktaal het *pyrotechnische mengsel* of de *sas*. Het verbrandt explosief bij een temperatuur van circa  $350^\circ\text{C}$ . Aan de sas worden meestal hulpstoffen toegevoegd. Verbindingen van allerlei metalen zorgen voor kleurige lichteffecten en organische kleurstoffen zorgen voor gekleurde rook. Helaas is een groot vuurwerk niet alleen mooi. De kleurstoffen en de (zwaar-)metaalzouten kunnen gevaarlijk zijn voor de gezondheid en voor het milieu.

### Een explosieve reactie

De beste mengverhouding van buskruit — 75% salpeter, 15% houtskool en 10% zwavel — is proefondervindelijk vastgesteld. Als we er van uitgaan dat kaliumnitraat tijdens de explosie fungeert als leverancier van zuurstof voor de verbranding van zwavel en koolstof, dan leert een berekening dat er, ondanks het grote massapercentage kaliumnitraat, te weinig zuurstof beschikbaar is voor de volledige verbranding van zwavel en koolstof. Zuurstof uit de lucht kan niet aan de verbranding bijdragen; daarvoor verloopt de reactie te snel.

De explosie van buskruit levert niet alleen gassen op, maar ook veel vaste (rook)deeltjes.



Afhankelijk van de precieze samenstelling van de sas varieert de verhouding van de reactieproducten enigszins. De tabel geeft globaal de reactieproducten van de ontploffing van tien kilogram buskruit weer. De tabel laat zien dat buskruit ook water bevat en dat er een tiental verschillende reactieproducten ontstaat. In explosierend buskruit is geen sprake van een optelsom van enkele eenvoudige reacties. Bestudering van het reactiemechanisme in ontplofend buskruit is dan ook niet gemakkelijk. Toch is de voortgang van de reactie deels opgehelderd, door de deelreacties te bestuderen.

### Koolstof en nitraat

Een mengsel van fijngespoederd koolstof en kaliumnitraat ontbrandt tussen 365 en 385°C. Dat is hoger dan de ontbrandingstemperatuur van buskruit ( $\pm 270^\circ\text{C}$ ). Nog voordat het  $\text{C/KNO}_3$ -mengsel ontbrandt is de geur van stikstofdioxide ( $\text{NO}_2$ ) al waar te nemen en is kaliumnitriet ( $\text{KNO}_2$ ) als tussenproduct aan te tonen. Blijkbaar reduceert koolstof het nitraat tot nitriet. Als de proef wordt uitgevoerd met kaliumnitriet in plaats van kaliumnitraat, ontstaan heel andere producten. Afbeelding 9a vermeldt de omzettingen die waarschijnlijk optreden bij deze deelreactie van een buskruitexplosie.

Bij de thermische ontleding van dikaliumethyndiolaat ( $\text{KOC}\equiv\text{COK}$ ) ontstaan onder

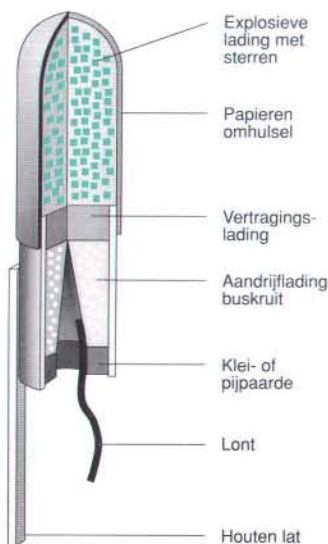
andere koolstofdeeltjes die heter zijn dan  $2000^\circ\text{C}$ . Deze hete deeltjes veroorzaken de fellevende lichtflits. De ontleding van dit derivaat van ethyn ( $\text{HC}\equiv\text{CH}$ ) is sterk exotherm, dat wil zeggen dat er veel warmte bij vrijkomt. Daardoor kan de reactie zichzelf gaande houden.

### Zwavel en nitraat

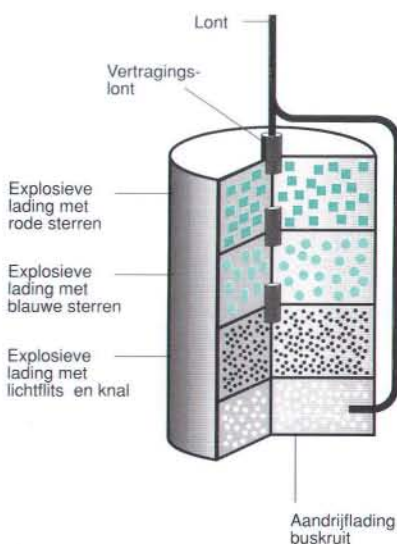
Uit de reactie tussen zwavel en kaliumnitraat, die plaatsvindt tussen 328 en  $340^\circ\text{C}$ , ontstaan



7



8a



b

c



sulfaten en stikstofoxyden (afb. 9b). Nitrieten geven met zwavel vooral thiosulfaat en distikstofmono-oxyde ( $N_2O$ ). Dit gas ontstaat ook bij de reactie tussen koolstof en nitriet; het is bekend onder de naam lachgas. Lachgas bevat ruim dertig volumepercenten zuurstof. Dat is meer dan de twintig procent die in lucht voorkomt. Lachgas levert dan ook de zuurstof voor de verbranding van zwavel en koolstof tot zwaveldioxyde en koolstofdioxyde.

### Zwavel en koolstof

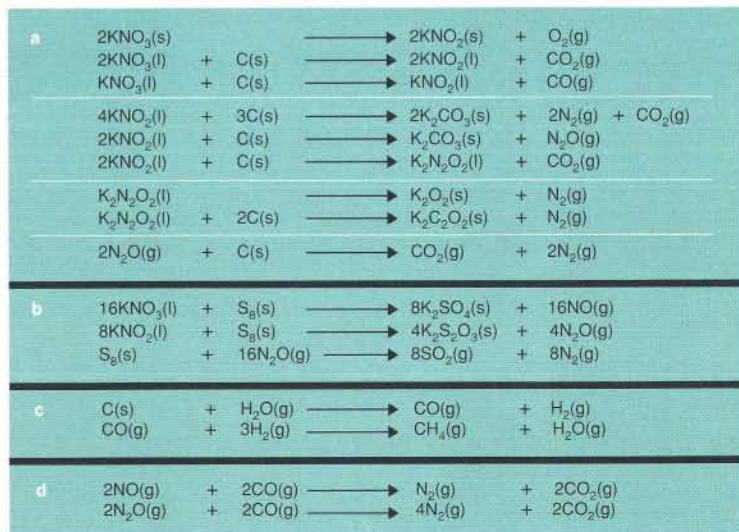
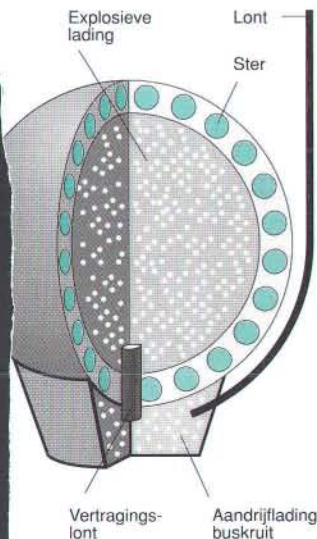
Zuiver koolstofpoeder en zuiver zwavel reageren pas boven de zeshonderd graden celsius met elkaar tot koolstofdissulfide ( $CS_2$ ). In buskruit treedt de explosieve reactie op bij een veel lagere temperatuur; er wordt dan ook geen koolstofdissulfide gevormd. Met houtskool in plaats van zuiver koolstof ontstaat bij een reactie met zwavel gemakkelijk diwatersulfide ( $H_2S$ ). Blijkbaar zijn 'verontreinigingen' in

7. Een serie vuurpijlen is gemonteerd op een houten rek voor gebruik bij een groot feestvuurwerk.

8. de constructie van vuurwerk bepaalt het effect ervan. 8a is een echte vuurpijl, de andere twee worden uit een stalen buis, een mortier, afgevuurd. Het effect kan enkelvoudig zijn, zoals in de 8a en 8c, of gecombineerd. Zo geeft de 'bom' van 8b eerst een wolk rode sterren, dan een wolk blauwe en tenslotte een helle lichtflits en een knal. De sterren die aan de buitenkant van 8c zitten, vormen na de explosie geen wolk, maar een prachtige bol.

TABEL Samenstelling en explosieproducten van 10 kg buskruit

Samenstelling		Explosieproducten	
Hoeveelheid (mol)	Massa (%)	Gassen (mol)	Vaste stoffen (mol)
74 $KNO_3$	75,5	35 $N_2$	19 $K_2CO_3$
95 C	11,7	56 $CO_2$	7 $K_2SO_4$
31 S	9,7	14 CO	8 $K_2S_2O_3$
16 $H_2O$	2,9	3 $CH_4$	2 $K_2S_2$
		2 $H_2S$	2 KSCN
		4 $H_2$	1 $(NH_4)_2CO_3$
ca. 10 kg / ca. 6 l		ca. 23000 l	ca. 6 kg



10, 11 en 12. Explosielassen of *cladden* is een koude lastechniek voor vlakke platen die van verschillende metalen kunnen zijn. Twee platen worden, met kleine houtblokjes ertussen, op elkaar gelegd. Men brengt een rand aan om de bovenste plaat en vult de bak die zo ontstaat met een explosief. Na ontsteking raast de explosie met een snelheid van enkele kilometers per seconde over de plaat. De enorme druk die daarbij ontstaat waist de bovenste plaat op de onderste. De atomen van beide platen naderen elkaar zo dicht dat ze een metallische binding aangaan. De lucht wordt als een krachtige jet tussen de platen uitgeperst en neemt de afstandsblokjes mee.



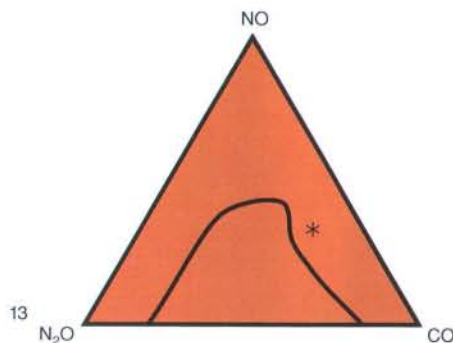
10

houtskool verantwoordelijk voor de productie van  $H_2S$ . Andere reacties die optreden (afb. 9c) zijn de watergasreactie en vervolgens de synthese van methaan, reacties die ook de basis vormen van de (steen)kolenvergassing.

### Gasreactie

De koolstof-nitraat- en de zwavel-nitraatreactie leveren een grote bijdrage aan de (exotherme) reactie in ontploffend buskruit, maar met enige voorzichtigheid zijn ze zonder explosiegevaar afzonderlijk uit te voeren. De explosieve kracht is dan ook voornamelijk toe te schrijven aan reacties tussen de gasen die ontstaan.  $N_2O$ ,  $NO$  en  $CO$  vormen samen explosieve mengsels. In een driehoeksdiaagram (afb. 13) geeft elk punt een mengverhouding van de drie gasen weer; de lengte van de loodlijn vanuit een 'mengpunt' naar de tegenoverliggende zijde geeft telkens het percentage van het betreffende gas in het mengsel. In dit diagram zijn de explosiegrenzen globaal weergegeven.

Als wordt aangenomen dat er in eerste instantie geen  $CO_2$  ontstaat, blijkt uit een berekening dat de massaverhouding  $N_2O:NO:CO$  in het gasmengsel van de buskruitreactie globaal 7:21:31 is. Deze verhouding (\* in afb. 13) ligt dicht bij de explosielijn in het driehoeksdiaagram. Een hoger percentage nitraat in het



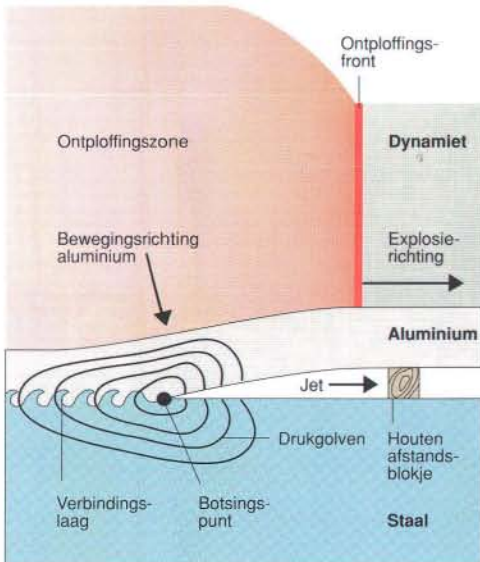
13. De lijn in dit driehoeksdiaagram geeft de explosieve verhoudingen van de gasen  $N_2O$ ,  $NO$  en  $CO$  aan. Het sterretje geeft de mengverhouding van de gasen in exploderend buskruit weer.

14. Een simulatie van detonatie-schokgolf die van links naar rechts door een stalen cilinder loopt. De druk loopt van nul tot tot 33 GPa (330 000 atmosfeer, rood). Bovenin reflecteert de golf tegen de wand.

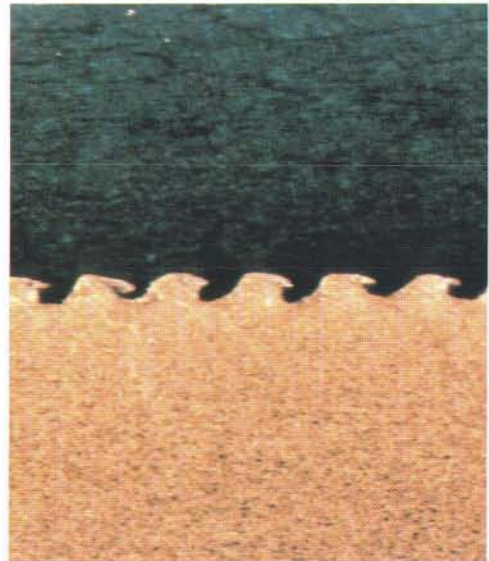
buskruitmengsel verstoort de verhouding  $N_2O:NO:CO$  tot buiten de explosiegrenzen.

Tien kilogram buskruit levert circa 2900 kJ energie. Twee derde van deze energie is afkomstig van de gasreacties (afb. 9d). Het hoofdaandeel wordt geleverd door de reactie van stikstofmono-oxyde met koolstofmono-oxyde, maar ook de reactie van distikstofmono-oxyde met koolstofmono-oxyde doet mee. De watergasreactie en de synthese van methaan leveren

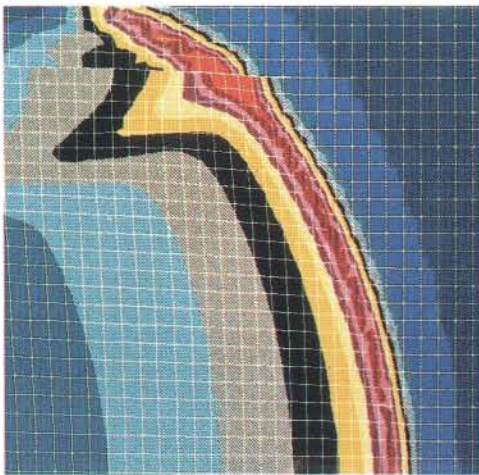




11



12



14

ongeveer vijftien procent van de reactiegassen. Het watergehalte van het buskruit levert daarmee een belangrijke bijdrage aan de explosieve (gas)druk.

### Dynamiet

Alfred Nobel (1833-1896) heeft miljoenen verdiend met de productie en verkoop van dynamiet. Nobel leerde het vak van zijn vader,

Immanuel Nobel. De Zweedse familie had een munitiefabriek in St. Petersburg (nu Lenin-grad) en leverde oorlogsmateriaal voor de Krimoorlog (1854-1856). Immanuel Nobel fabriceerde mijnen met buskruit, maar was op zoek naar een krachtiger alternatief. Hij kwam terecht bij nitroglycerine, dat in 1847 voor het eerst door de Italiaanse chemicus Ascanio Sobrero was gemaakt. Voordat hij resultaat had met zijn onderzoek was de Krimoorlog echter voorbij en ging zijn bedrijf failliet.

De familie Nobel keerde in 1863 naar Zweden terug. Alfred Nobel werd er beroemd (en maakte fortuin) met de uitvinding van dynamiet. Nitroglycerine is een zeer schokgevoelige vloeistof en daarom een zeer gevaarlijke springstof. Nobel ontdekte dat absorptie van nitroglycerine in kiezelgoer (een poreuze, krijtachtige afzetting van de pantsers van kiezelwieren) een hanteerbare en relatief veilige springstof opleverde: dynamiet.

Met andere bindmiddelen, zoals zaagsel, zetmeel en schietkatoen maakt men diverse soorten dynamiet. Daarnaast wordt vaak twintig tot zestig procent ammoniumnitraat als extra zuurstofbron toegevoegd. Koolstof (in organische verbindingen) en zuurstof (in nitro-verbindingen) zijn op deze manier goed met elkaar 'vermengd'. Dynamiet wordt vooral gebruikt voor vreedzame doeleinden.

## Ammoniumnitraat

Op 29 april 1942 ontplofte in Tessenderlo 150 ton ammoniumnitraat. Enkele honderden mensen kwamen bij de explosie om. Het ammoniumnitraat was in een silo aaneengekoekt. Een werknemer probeerde met behulp van een springstof de harde cake in hanteerbare brokken te breken. Deze manier van verpulveren werd regelmatig toegepast bij kaliumchloride (KCl), maar had bij ammoniumnitraat fatale gevolgen.

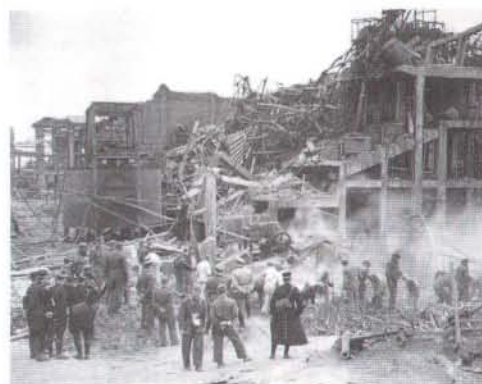
Ammoniumnitraat, een bekend bestanddeel van kunstmest, kan explosief ontleden. Meestal is het echter de combinatie van ammoniumnitraat met een brandstof die voor de explosie zorgt.

Op 16 april 1947, explodeerde het Franse vrachtschip *ss Grandchamp* in de haven van Texas. Het schip had 2500 ton ammoniumnitraat aan boord, verpakt in papieren zakken die gecoat waren met bitumen. Daarnaast bestond de lading uit olie en sisal. Na een brand explodeerde het schip en veroorzaakte vervolgens brand op de *High Flyer* die 250 meter verderop aan de kade lag en geladen was met ammoniumnitraat en zwavel. De explosie die daarna plaatsvond en de branden die daar het gevolg van waren kostten het leven aan 512 mensen. Meer dan 3000 mensen raakten gewond.

De ontledingsprodukten van ammoniumnitraat zijn enigszins afhankelijk van de temperatuur. Het zout smelt bij 169,5°C en ontleedt bij voorzichtig verwarmen in ammoniak en salpeterzuur. Boven 200°C ontstaan lachgas ( $N_2O$ ) en water, en boven 250°C ontleedt ammoniumnitraat explosief in stikstof, zuurstof en water.



I-1



I-2

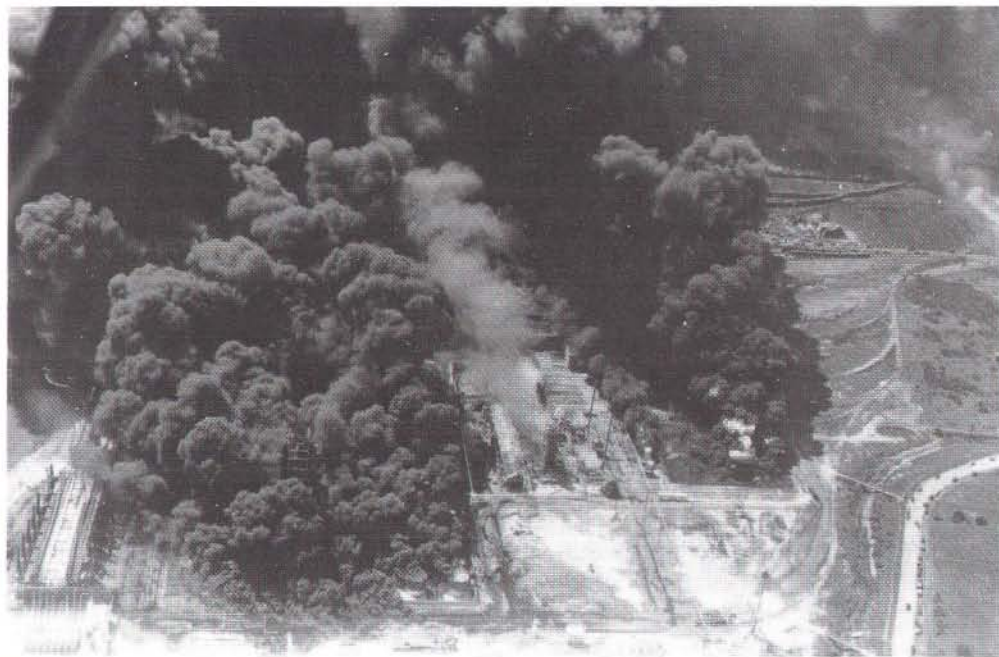
### Raketten

In de ruimtevaart wordt veelvuldig gebruik gemaakt van vaste brandstoffen. In deze brandstoffen treedt een gecontroleerde explosie op, een deflagratie. In feite is een raket niets anders dan een uit de kluiten gewassen vuurpijl. De brandstof van de grote stuwrocketten of *boosters*, die de eerste twee minuten na de start extra stuwkracht leveren, bestaat voor 70% uit ammoniumperchloraat, voor 16% uit aluminiumpoeder en voor 14% uit organisch bindmiddel. Het bindmiddel is een polymeer van butadien, acrylonitril, acrylzuur en een epoxyhars. Het brandstofmengsel bevat bovendien nog een kleine hoeveelheid ijzer(III)oxyde als katalysa-

tor. In totaal bevatten de boosters van een grote raket of Space Shuttle zo'n miljoen kilogram vaste brandstof. Een booster is gemaakt voor maximale stuwkracht, niet voor volledige verbranding van de brandstof.

Vanaf zo'n 200°C begint de deflagratie van ammoniumperchloraat. Die reactie levert zuurstof en chloor voor de verbranding van het aluminium en het bindmiddel. Binnen twee minuten brengen de boosters zo'n 218 ton zoutzuur, 23,6 ton chloorgas, 6,4 ton stikstofoxyden en 276 ton aluminiumoxyde in de atmosfeer. Binnen een straal van 34 km van de lanceerplaats komt zo'n 55 ton zoutzuur op de grond terecht. Elke lancering veroorzaakt dan ook een aanzienlijke schade aan het milieu.



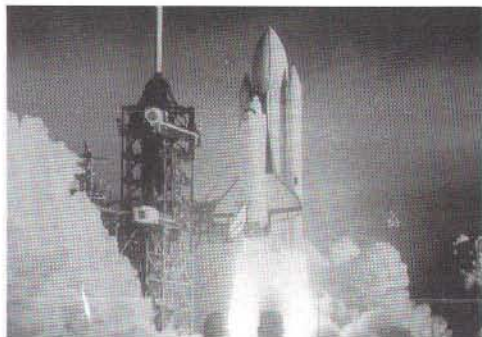


I-3

I-1 en I-2. In 1942 werd de Kempense industriële plaats Tessenderlo opgeschrikt door een enorme explosie. 'De Ramp' liet vrijwel niets

heel van de fabriek die de lucht in vloog, veroorzaakte een ravage in het dorp en koste honderdnegentig mensen het leven.

I-3. Ten gevolge van de explosie van twee schepen met ammoniumnitraat in Texas City, ontstonden grote branden.



15

15. Misschien is ammoniumnitraat een alternatief voor het ammoniumperchloraat uit de boosters

van de Space Shuttle. De chloorverbindingen die nu vrijkomen, maken van elke lancering een milieuraamp.

#### Literatuur:

Zeeuwen JP. Ontploffend stof – Oorzaken en preventie van stofexplosies. *Natuur & Techniek* 1986; 54: 3, 173-185.  
Klein WJ. Van vlam tot vuur. *Natuur & Techniek* 1987; 55: 12, 956-997.

Seel F. Geschichte und Chemie des Schwarzpulvers. *Chemie in unserer Zeit* 1988; 22: 1, 9-16

Medard LA. *Accidental Explosions*, Volume 1 & 2. John Wiley & Sons, 1989.

#### Bronvermelding illustraties

Transworld Features Holland BV, Haarlem: 848/849, 4  
Prins Mautits Laboratorium TNO, Rijswijk: 2, 3 en 14  
Explosieven Opruimings Commando, Koninklijke Landmacht, Culemborg: 5 en 6

JNS Pyrotechniek BV, Leeuwarden: 7

Clad Metals BV, Rozendaal: 10

Shockwave Metalworking Technologies BV, Schijf: 12

René Heselms, Tessenderlo: I-1 en I-2

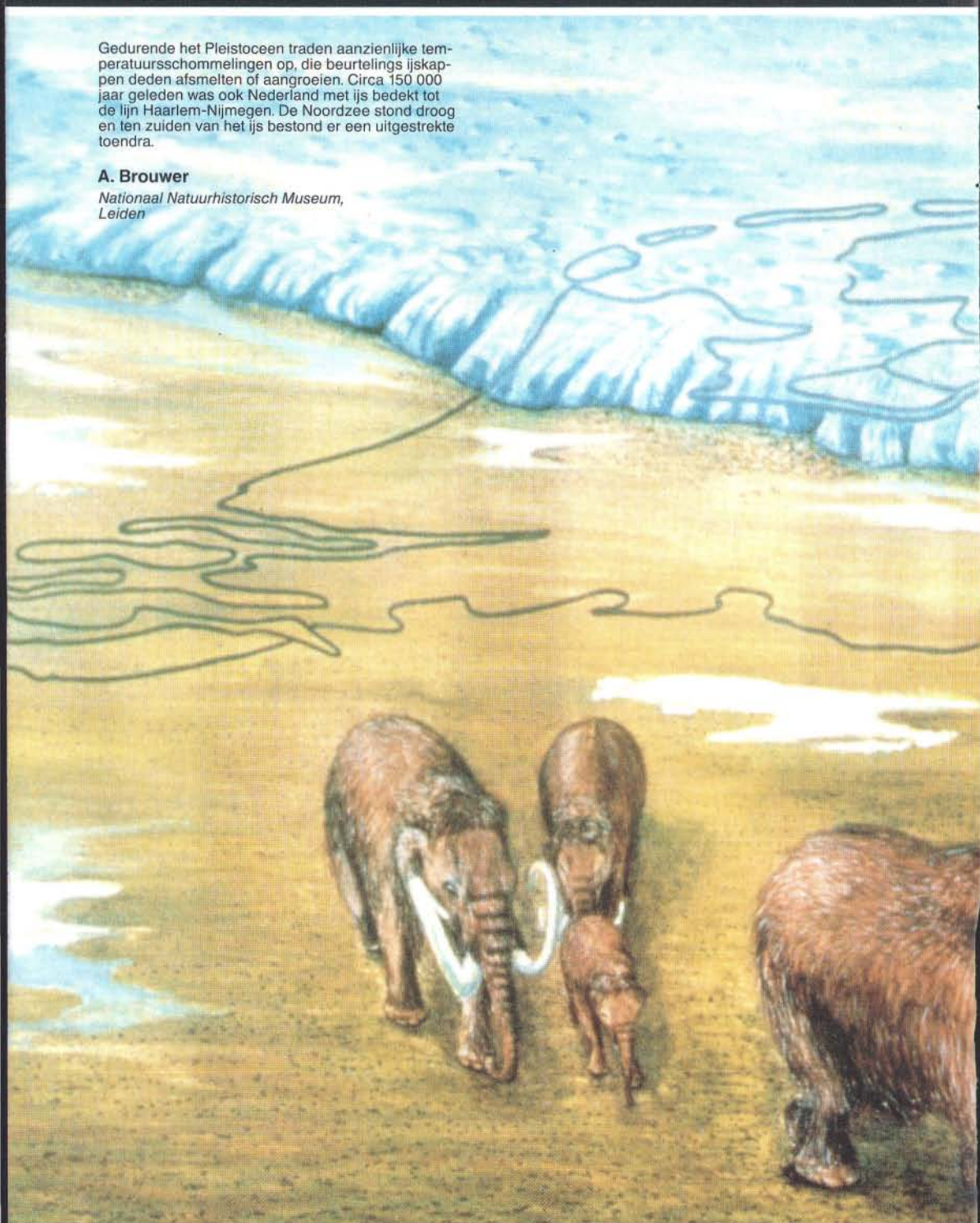
UPI/Bettmann Newsphotos, New York: I-3

NASA: 15

Gedurende het Pleistoceen traden aanzienlijke temperatuurschommelingen op, die beurtelings ijskappen deden afsmelten of aangroeien. Circa 150 000 jaar geleden was ook Nederland met ijs bedekt tot de lijn Haarlem-Nijmegen. De Noordzee stond droog en ten zuiden van het ijs bestond er een uitgestrekte toendra.

**A. Brouwer**

*Nationaal Natuurhistorisch Museum,  
Leiden*

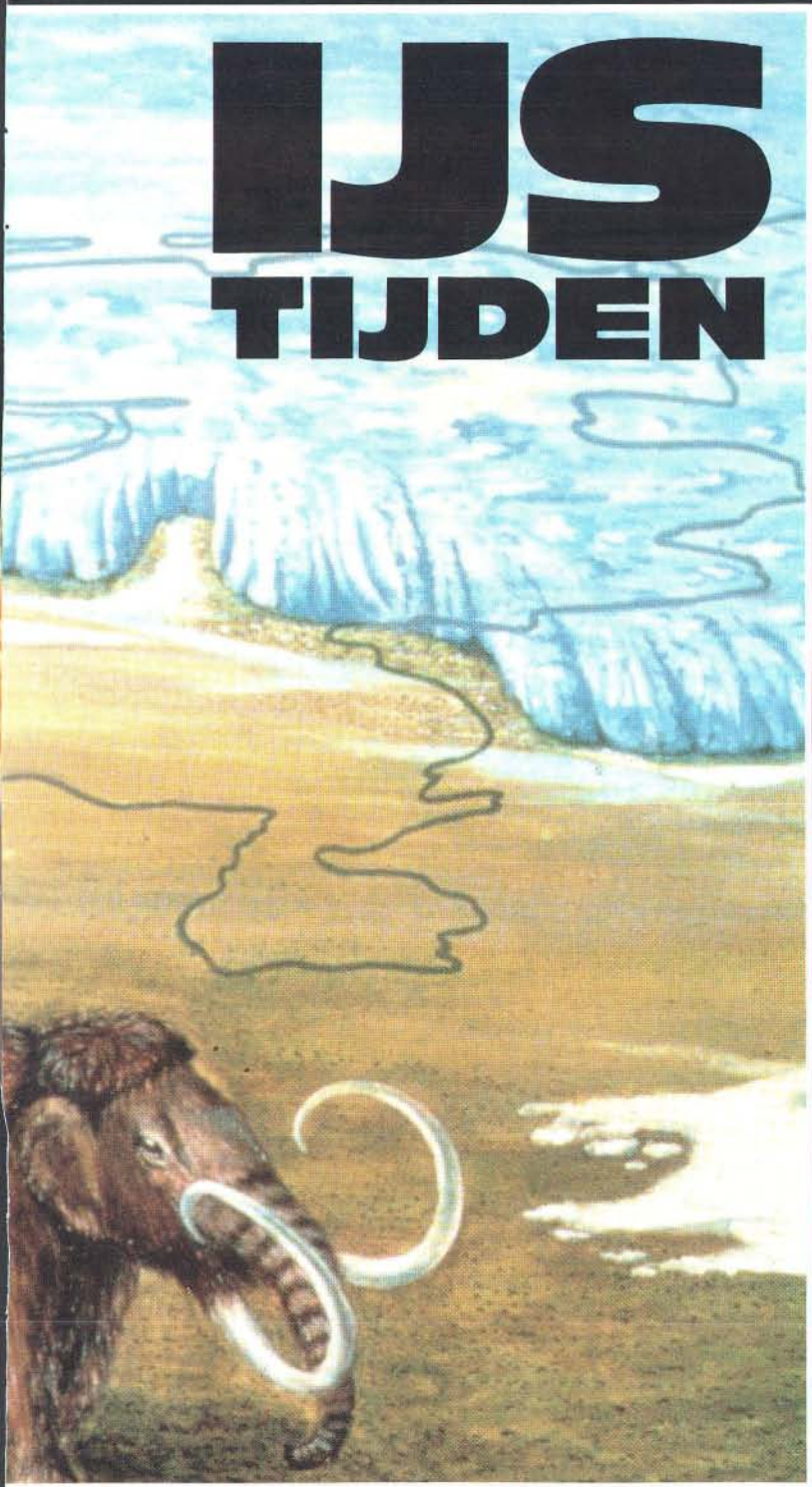




SOMS RILT DE AARDE EVEN

# IJS TIJDEN

De twee grote landijskappen, op Groenland en op Antarctica, zijn een vertrouwd beeld op onze aarde. Toch is de aarde al sinds twee en een half miljard jaar doorgaans een planeet zonder ijs, met een veel hogere zeespiegel dan nu en met minder uitgesproken klimaatzones tussen evenaar en polen. Een tijdvak met ijskappen duurt enige miljoenen jaren en wisselt in de geschiedenis van de aarde af met veel langere perioden zonder of nagenoeg zonder ijs. Gedurende de laatste miljard jaar heeft de aarde zeker vier maal zo'n ijsstijdvak doorgemaakt. Veranderingen in de baan van de aarde om de zon zijn verantwoordelijk voor de snel wisselende hoeveelheid ijs binnen een interval met ijsstijden. Veranderingen in de aarde zelf verklaren het optreden van ijsstijdvakken op veel grotere schaal.





Kort geleden, zo'n 150 000 jaar, kende de aarde naast de landijsmassa's op Groenland en Antarctica nog twee grote ijskappen. Van de bergen van Scandinavië reikte het ijs tot de breedte van Amsterdam; een veel grotere ijskap op Noord-Amerika reikte tot New York, dat op dezelfde breedte ligt als Napels. Voor ons lijkt 150 000 jaar een lange tijd, maar vergelijken we de ouderdom van de aarde met een mensenleven, dan is het amper een dag.

Het besef dat de aarde gedeeltelijk met gletsjers bedekt is geweest, is geboren in de Alpen. Daar zijn de mensen vertrouwd met het beeld van een heen en weer schuivend gletsjerfront en met de sporen die het ijs achterlaat. Deze sporen bestaan uit *morenen*. Dat zijn opeenhopingen van bergpuin langs de rand of aan het front van een gletsjer. Zulke sporen kun je ook buiten het gebergte vinden.

Al in de eerste helft van de vorige eeuw kwamen onderzoekers tot de conclusie dat de Alpen eens een geweldige ijskap hebben getorst, die zich uitstreckte tot ver buiten het gebergte. Alleen de hoogste bergtoppen staken boven deze ijskap uit. Na de ontdekking van gletsjer-

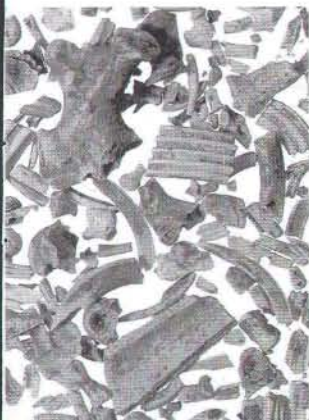
krassen op een oude ondergrond bij Berlijn in 1875, vond ook voor het Scandinavische gebied de theorie dat grote delen van Europa eens met een geweldige ijskap waren bedekt, algemeen ingang.

Spoedig bleek dat morenen in lagen boven elkaar kunnen voorkomen. Ze worden gescheiden door afzettingen, met overblijfselen van een flora en een fauna die niet wezenlijk verschillen van de huidige. In de Alpen was dit ook al gebleken. Grote vergletsjeringen waren kennelijk bij herhaling opgetreden; *glacialen* ofwel ijstijden wisselen af met *interglacialen*, de tijdsperiodes tussen twee ijstijden.

Een verandering van klimaat leidde 150 000 jaar geleden in Europa tot het ontstaan van een ijskap die vier maal zo groot was als de huidige Groenlandse, en in Noord-Amerika ontstond een ijskap groter dan de huidige Antarctische. Overigens is hiermee niet gezegd dat 150 000 jaar geleden voor het eerst zo'n ijskap ontstond. De klimaatsverandering had ingrijpende gevolgen. Verlaging van temperatuur was niet eens het belangrijkste aspect. In de tropische gordel bleef zij beperkt tot 1 à 2°C, poolwaarts







2



3

nam zij toe tot circa 10°C. De temperatuurgradiënt van de evenaar naar de polen werd hierdoor steiler, waardoor klimaatgordels werden samengedrukt. Flora en fauna schoven mee, zowel op het land als in de oceanen.

De watercirculatie in de oceanen en de luchtbewegingen in de atmosfeer ondergingen grote

veranderingen. Op het noordelijk halfrond verschoven de banen met lage luchtdruk zuidwaarts. Daardoor kwamen, op de plaats waar nu de woestijn gordel ligt, af en toe regenrijke fasen ofwel *pluvialen* voor, met grote meren als gevolg. Ten zuiden van de ijskappen had de wind vrij spel in één enorme, spaarzaam begroeide vlakte. De wind nam fijn zand en nog fijner materiaal (silt) mee en zette dat verder naar het zuiden af als dekzand en löss.

De ijskappen en gletsjers hielden zo'n geweldige hoeveelheid water vast, dat het zeeniveau meer dan honderd meter daalde. Grote delen van ondiepe zeeën, zoals de Noordzee en het Sundaplat in Indonesië, vielen droog. Tijdens de interglacialen verdwenen ze weer onder water. Langs vele rivieren ontstonden terrasvormige afzettingen onder invloed van wisselende hoeveelheden verweringsmateriaal en water. Door de schommelingen van het zeeniveau verschenen er ook terrassen in de benedenloop van rivieren. Kortom, de gebeurtenissen van het ijstijdvak hebben nagenoeg geen enkel aspect in de natuurlijke gesteldheid van onze planeet ongemoeid gelaten.

### De oceaانبodem

Tot het midden van deze eeuw was ons beeld van ijstijden grotendeels gebaseerd op de sporen die op het land zijn achtergebleven. Dit beeld is niet volledig doordat op het land veel sporen zijn uitgewist door erosie — de afslijpende werking van water, ijs en wind. Bovendien waren er tot voor kort op het land weinig

1. Op dit moment zijn Groenland en Antarctica met ijs bedekt. Dit is het front van een gletsjertong van de Groenlandse ijskap.

2 en 3. Resten van flora en fauna uit de laatste ijstijden kunnen een beeld geven van het leven uit die lang vervlogen tijden. Onderzoekers zeven en spoelen hier een sediment van de Maas, zodat fijn grind, schelpresten, houtresten en zoogdierfossielen (2) overblijven.





4. De Belvédèregroeve bij Maastricht. Op een basis van kalksteen ligt een dikke laag grind uit een koude periode. Uit fossiele resten blijkt dat toen onder meer paarden en wolharige neushoorns het gebied bevolkten. In een volgende, warmere tijd heeft de Maas lagen grind, zand en leem afgezet, waarin resten gevonden zijn van de drie-kleurige muis en de fluit-

haas. Dit zijn echte steppe-dieren. De bovenste lagen bestaan uit löss dat de wind heeft afgezet in de koudste fasen van de laatste ijstijden.

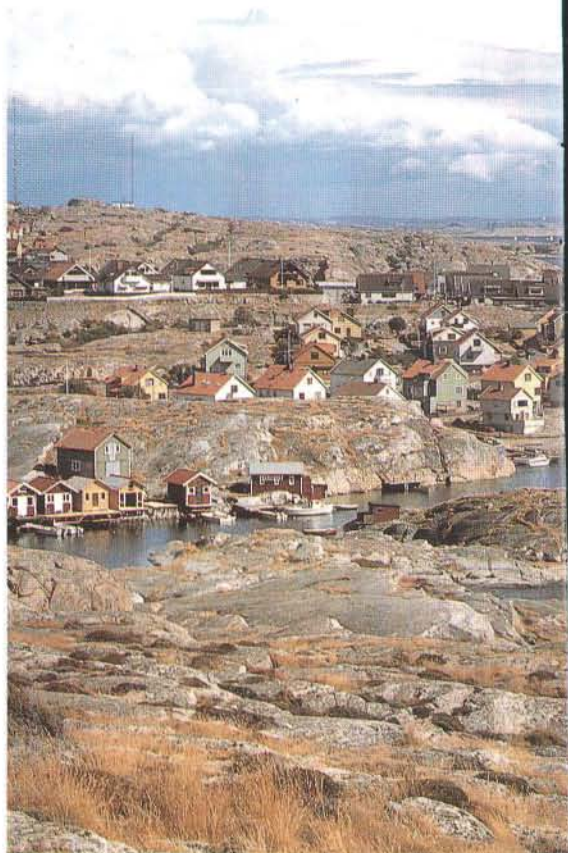
5. Dit gebied, dat nu weer bewoonbaar is, laat duidelijk de sporen zien van de polijstende werking van een ijskap, die daar ooit over de gesteenten schuurde.



4

mogelijkheden voor ouderdomsbepalingen in jaren, met uitzondering van de datering met koolstof-14, die een bereik van circa 60 000 jaar heeft.

Uit oceanografisch onderzoek is gebleken dat de bodem van de oceaan ons een veel vollediger beeld van de ijstijden kan geven dan de landbodem. De afzetting van klei en kalkslib op de oceaanbodem is heel gelijkmatig en nauwelijks door erosie onderbroken. De sedimenten en fossielen daaruit verschaffen een overvloed aan informatie: chemische, fysische en klimatologische gegevens en kennis over uitgestorven planten en dieren. Bovendien leveren sedimentaire gesteenten uit de oceaanbodem mogelijkheden voor ouderdomsbepalingen uitgedrukt in jaren. Het oceanografische onderzoek heeft een nieuw licht geworpen op een oud vraagstuk: wat is de oorzaak van de klimaat-schommelingen?



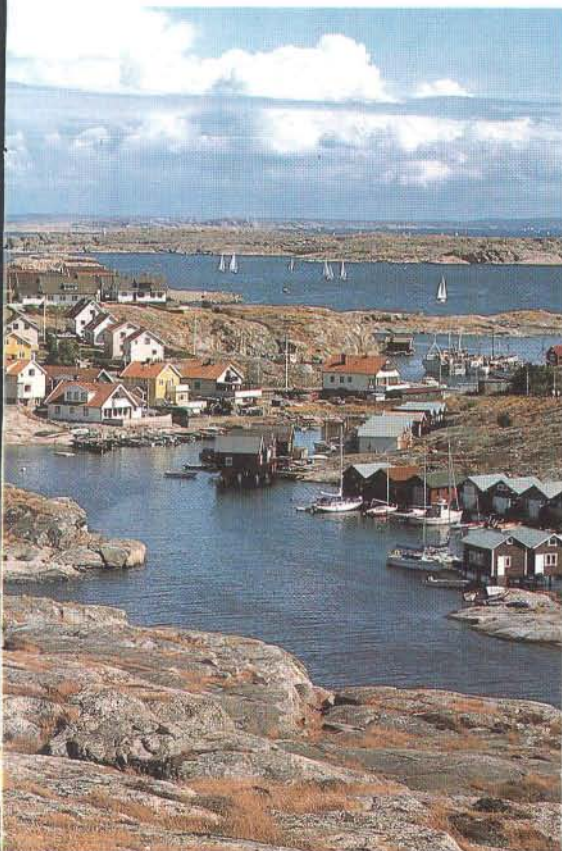
5

## Ouderdomsbepalingen

Radiometrische ouderdomsbepalingen zijn in de geologie van groot belang. Zij voorzien de relatieve tijdschaal, die berust op de opeenvolging van afzettingen, van jaartallen. Voor deze ouderdomsbepalingen komen in de eerste plaats instabiele elementen met een zeer lange halfwaardetijd in aanmerking.

Met de kalium/argon-techniek kunnen we oceanische basalten dateren.  $^{40}\text{K}$  (kalium) valt uiteen in  $^{40}\text{Ca}$  (calcium) en  $^{40}\text{Ar}$  (argon), met een halveringstijd van 1,25 miljard jaar. In een gesloten systeem is de verhouding  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$  een maat voor het tijdsverloop sinds de kristallisatie van het mineraal. Door de lange halveringstijd is deze techniek echter onbetrouwbaar voor materiaal van geringe ouderdom. In oceanische basalten zijn ook ompolingingen van het aardse magneetveld meetbaar. Zo heeft de K/Ar-techniek het mogelijk gemaakt de magnetische





## De astronomische theorie

De aanzienlijke en geologisch gesproken snelle wisselingen van het klimaat in het jongste verleden van de aarde, hebben geleerden van diverse pluimage reeds lang beziggehouden. Al in de negentiende eeuw wezen enkele geleerden er op, dat veranderingen in de baan van de aarde om de zon van invloed kunnen zijn op het klimaat. In de jaren twintig van deze eeuw werkte Milutin Milankovitch, ingenieur en later hoogleraar in de wiskunde aan de universiteit van Belgrado, dit idee uit tot zijn, goed gefundeerde, *astronomische theorie*.

In de baan die de aarde om de zon beschrijft treden onder invloed van de aantrekkingskracht van de andere planeten drie belangrijke cyclische veranderingen op. De aarde beschrijft een ellipsvormige baan, met een assenverhouding van ongeveer 60:59 (dus bijna een cirkel). Die verhouding verandert enigszins met een periode van 100 000 jaar. De zon bevindt zich in een van de brandpunten van de ellips. Het gevolg is dat het zomer- en winterhalfjaar niet precies evenlang duren. Nu duurt het zomerhalfjaar op het noordelijk halfrond zeven dagen langer dan het winterhalfjaar. Dat verschil kan oplopen tot dertig dagen als de aardbaan het sterkst van een cirkelvorm afwijkt.

Ten tweede schommelt de hoek die de aardas

## INTERMEZZO

schaal te ijken. Dit is voor het onderzoek van de oceaانبodem van groot belang geweest.

Dateringen met het radioactieve isotoop koolstof-14 hebben een ander uitgangspunt.  $^{14}\text{C}$  ontstaat in hoge lagen van de atmosfeer uit stikstof-14, onder invloed van kosmische straling. Het  $^{14}\text{C}$  verspreidt zich dan verder in de atmosfeer en komt in de vorm van koolstofdioxide in levende organismen terecht. Na de dood van een organisme wordt  $^{14}\text{C}$  met een halveringstijd van circa 5700 jaar afgebroken tot  $^{14}\text{N}$ . De overgebleven hoeveelheid, en dus de radioactiviteit, van  $^{14}\text{C}$  neemt voortdurend af en kan zo een maat zijn, voor de tijd die verlopen is sinds de dood van een organisme. Het  $^{14}\text{C}$ -gehalte ten opzichte van het niet-radioactieve koolstof (hoofdzakelijk  $^{12}\text{C}$ ) is zo gering dat er na ongeveer tien halveringstijden geen meetbare activiteit over is. Dit beperkt de toepassing

van deze techniek tot monsters die jonger zijn dan 60 000 jaar.

Ook met de thorium/uranium-verhouding kunnen we ouderdommen bepalen. Zeewater bevat wel uranium maar bijna geen dochterelementen, de elementen zoals thorium, die ontstaan door radioactief verval van uranium. Skeletten en schalen van in zee levende organismen bevatten aanvankelijk vooral uranium. Door het radioactief verval van het uranium stijgt geleidelijk de verhouding Th/U van skeletten en schalen. Deze verhouding levert een indicatie voor de tijd die verstreken is sinds het organisme het skelet of de schaal vormde. De thorium/uranium-techniek is bruikbaar voor ouderdomsbepalingen tot ongeveer 300 000 jaar, en vult dus het gat op tussen  $^{14}\text{C}$ - en kalium/argon-dateringen.

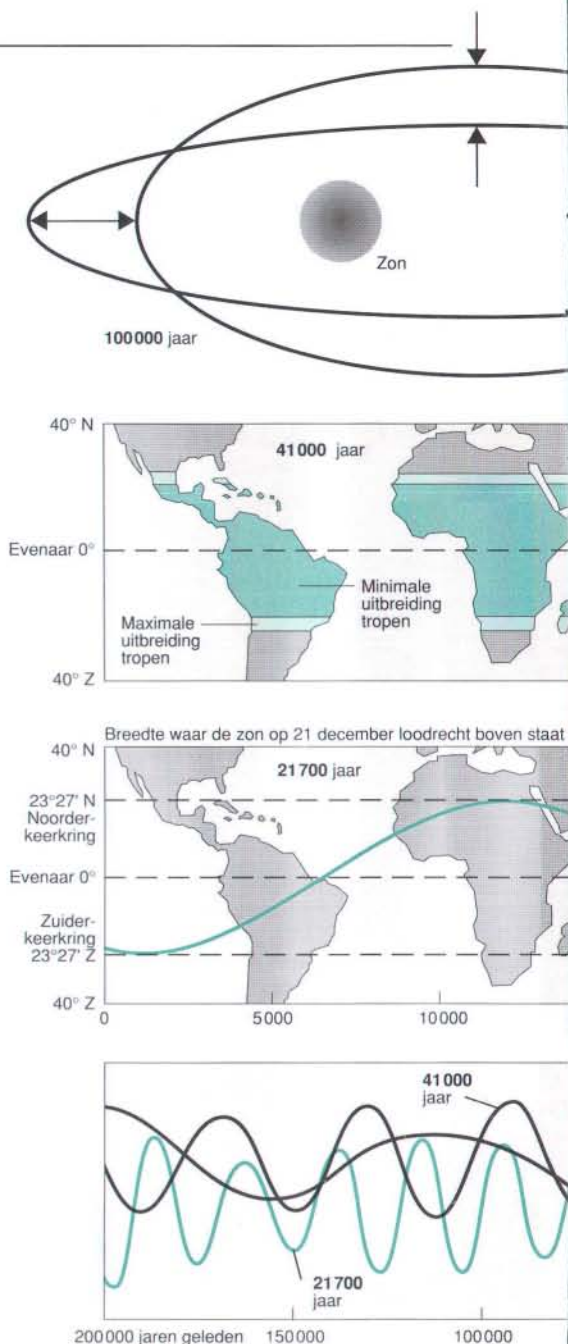
maakt met de richting loodrecht op het baanvlak van de aarde, ofwel de hoek die de evenaar maakt met het vlak van de aardbaan. De hoek varieert tussen  $22^\circ$  en  $24^\circ 30'$ , met een periode van 41 000 jaar (de huidige waarde is  $23^\circ 27'$ ). Een grotere hoek veroorzaakt een groter verschil tussen de seizoenen.

In de derde plaats beschrijft de aardas éénmaal in de 21 700 jaar een kegel rond de richting loodrecht op het baanvlak van de aarde. Daardoor verschuiven de seizoenen ten opzichte van het kalenderjaar. Op dit moment staat de aarde, in haar elliptische baan, het dichtst bij de zon als het op het noordelijk halfrond midden in de winter is. Over ongeveer 11 000 jaar zal dat midden in de zomer zijn.

Deze veranderlijke grootheden bepalen mede de hoeveelheid zonnestraling die de aarde aan de buitenzijde van haar dampkring opvangt; deze hoeveelheid wisselt met de afstand tot de zon en met de hoek tussen het raakvlak aan het oppervlak en het baanvlak. De drie variabele elementen beïnvloeden ook de lengte van de seizoenen en de verdeling van de ontvangen straling over de seizoenen en over de verschillende geografische breedten. De opgevangen hoeveelheid zonnestraling is bepalend voor het klimaat aan het aardoppervlak.

Milankovitch berekende voor de laatste 600 000 jaar, telkens met intervallen van 5000 jaar, de hoeveelheid zonnestraling die de buitenzijde van de dampkring ontving. Hij voerde de berekeningen uit voor zestien breedtegraden tussen  $75^\circ \text{NBr}$  en  $75^\circ \text{ZBr}$ , en steeds afzonderlijk voor het zomer- en het winterhalfjaar. De effecten van de drie variabele factoren heeft hij weergegeven in tabellen. Later hebben anderen uit zijn getallen grafieken samengesteld: de curven van Milankovitch. Deze stralingscurven vertonen een grillig verloop, doordat de perioden van de drie verschillende aspecten van de aardbaan om de zon niet even groot zijn. Bovendien zijn de gevolgen van deze drie factoren niet hetzelfde voor verschillende geografische breedten.

In de tijd van Milankovitch stonden veel geologen nogal sceptisch tegenover zijn uitkomsten. We moeten niet vergeten dat er toen voor de tamelijk recente ijstijden nog geen tijdschaal in kalenderjaren bestond. Evenmin kenden klimatologen het verband tussen op de dampkring ontvangen zonnestraling en het klimaat binnen de dampkring.



6

6. De factoren van Milankovitch herhalen zich steeds na een bepaalde tijd. De periode waarin de elliptische baan verandert, duurt 100 000 jaar. Hierdoor staat de aarde niet altijd even ver van de zon. De rotatieas schommelt met een periode van 41 000 jaar en

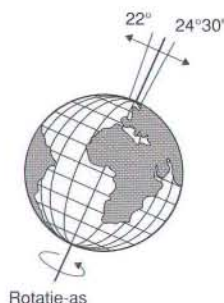
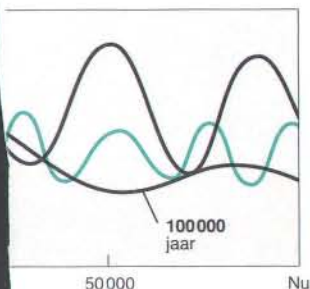
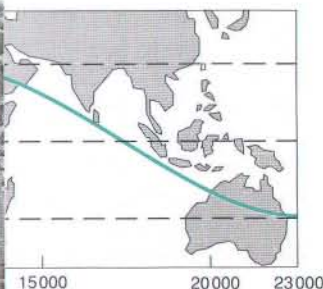
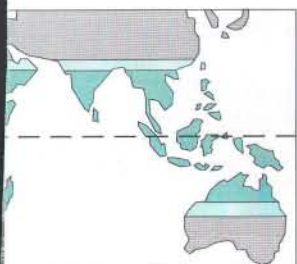
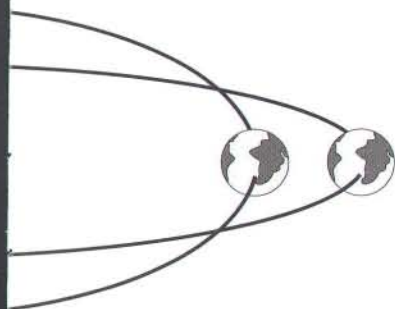
doorloopt de kegel om de as loodrecht op het baanvlak eens in de 21 700 jaar. Deze factoren beïnvloeden de positie van de keerkringen en de duur van de seizoenen. Op elk moment spelen alle drie de factoren een rol, maar het samenspel is telkens anders.



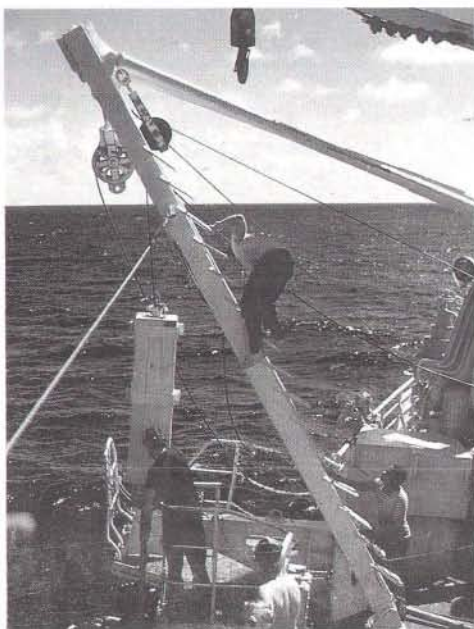
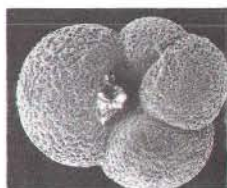
## Astronomische factoren herkend

De eerste steun voor de sterrenkundige theorie van Milankovitch kwam in 1969 uit onderzoek van de opgeheven koraalterrassen van Barbados, een eiland in Midden-Amerika. Deze koraalterrassen, gedateerd met de thorium/uraniu-techniek, bleken uit een tijd te stammen, waarin volgens de curven van Milankovitch hoge zeespiegels voorkwamen.

Een bewijs voor de theorie van Milankovitch waren de resultaten van het internationale CLIMAP-project (Climate Long-range Investigation Mapping and Prediction Project) uit 1976. Onderzoekers keken naar het zuurstofgehalte in de kalkschalen van foraminiferen in afzettingen op de oceaانبodem. Foraminiferen zijn eencellige dieren. In hun schalen van kalk ( $\text{CaCO}_3$ ) verwerken zij de stabiele zuurstofisotopen  $^{18}\text{O}$  en  $^{16}\text{O}$ . De verhouding van deze isotopen kan dienen als 'paleo-thermometer'. Spoedig bleek dat de hoeveelheid landijs deze verhouding in kalkschalen beïnvloedt. Bij verdamping ontsnapt er meer water met de lichte isotoop  $^{16}\text{O}$  dan met de zware isotoop  $^{18}\text{O}$ . Als dit water vastvriest in landijs neemt het  $^{18}\text{O}$ -gehalte in zee toe. Dit weerspiegelt zich in de  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -verhouding in de kalkschalen.



7, 8 en 9. De zeebodem verschaft ons veel informatie over klimaatschommelingen. Van in boorkernen gevonden foraminiferen leefden sommige (7) in koude omstandigheden, terwijl andere (8) typerend zijn voor tijden waarin de zee wat warmer was.



7

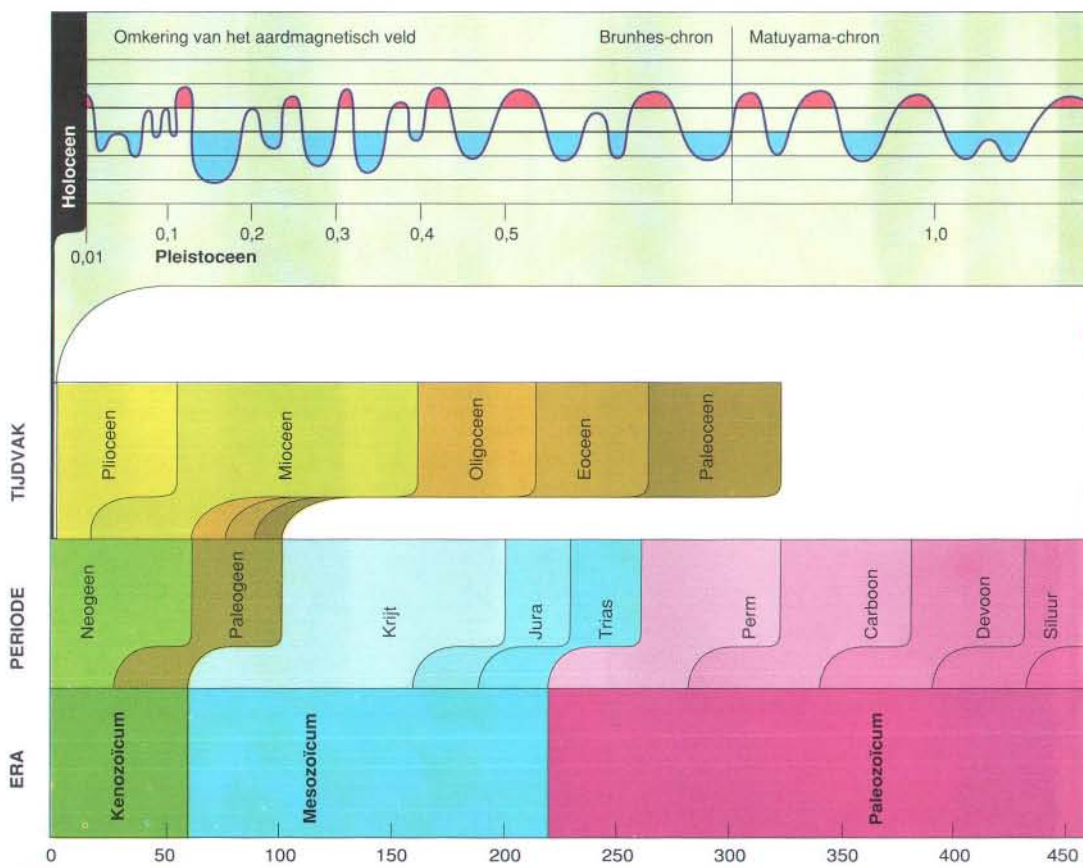
8

9

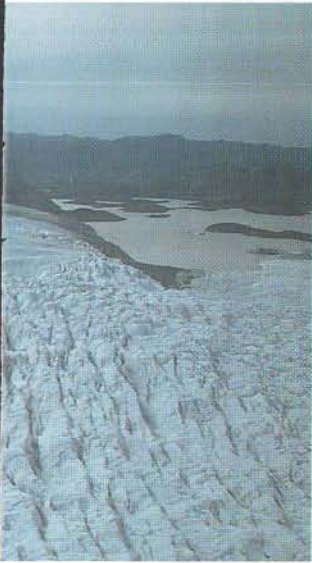
10 en 11. In een afsmeltgebied van een ijskap vormt het smeltwater grote meren. Waar het ijs zich over 'dremfels' in de ondergrond beweegt, ontstaan er scheuren in het ijs, die van enige hoogte goed zichtbaar zijn (10). Van dichtbij (11) vallen de overgangen van ijs naar morenen goed op. In vroegere ijs tijden zagen waarschijnlijk grote delen van de aarde er zo uit.



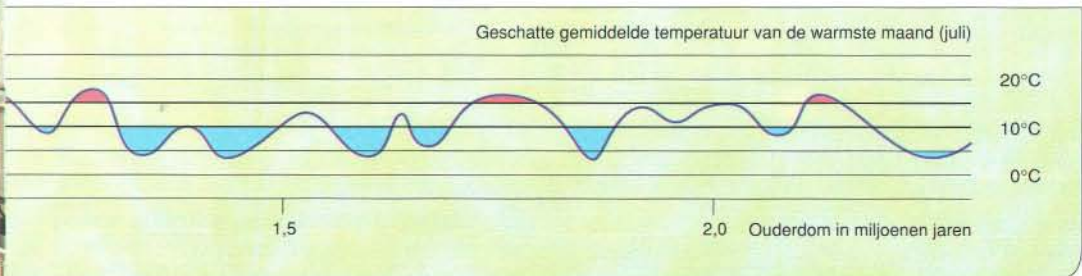
10







11



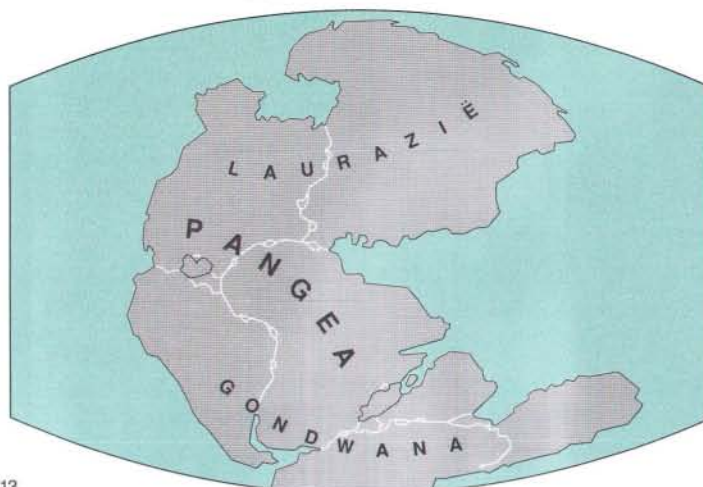
12. Het klimaat op aarde is meestal warmer dan nu het geval is. Het meest recente, ijstijdvak begon ongeveer 2,5 miljoen jaar geleden. In een ijstijdvak wisselen koude en warme tijden elkaar af. De heersende temperatuur laat zijn sporen na in de geologische afzettingen die in een bepaalde tijd ontstaan. De ompolingen van het aardmagnetisch veld helpen ons bij het dateren van die sedimenten. Zo krijgen we een beeld van de temperatuurschiedenis van de aarde.



Uit onderzoek aan verscheidene boorkernen uit de oceaanbodem kwam inderdaad het ritme van de afzonderlijke astronomische factoren van Milankovitch naar voren. Enkele lange boorkernen laten een ompoling zien van het aardse magneetveld, namelijk de grens tussen Matuyama-chron en Brunhes-chron, die gedateerd is op zevenhonderdduizend jaar geleden. Met de informatie uit de oceaanbodem verkregen de onderzoekers een gedetailleerd beeld van de wisselende hoeveelheid landijs op aarde gedurende de laatste twee en een half miljoen jaar.

Een halve eeuw na het pionierswerk van Milankovitch kreeg zijn theorie vaste voet. Toch wachtte nog een verrassing. In luchtbelletjes van Groenlands en Antarctisch ijs zijn mon-

13, 14 en 15. Het continent Pangea (13) bestond 200 miljoen jaar geleden. Dit heeft zich gesplitst in het noordelijke Laurazië en het zuidelijke Gondwana. 130 Miljoen jaar geleden heeft Gondwana zich al verder verdeeld (14). Ook de huidige situatie (15) is niet stabiel. Beide Amerika's bewegen zich westwaarts en verwijderen zich van Europa en Afrika.



13

sters bewaard gebleven van de atmosfeer uit de tijd dat de jaarlijkse sneeuwval het ijs laagje voor laagje opbouwde. De samenstelling van deze luchtbelletjes laat zien dat tijdens het laatste glaciaal de atmosfeer circa 30% minder koolstofdioxide bevatte dan tijdens het voorafgaande en het daarop volgende interglaciaal (respectievelijk het Eemien en het Holoceen). Het kan hier onmogelijk om menselijke invloeden gaan. Vanwaar dan deze verandering, die zich in relatief korte tijd voltrok?

De hoeveelheid koolstofdioxide in de oceaan is ongeveer zestig maal zo groot als in de atmosfeer. Het grote reservoir van de wereldzeen beheerst het evenwicht van koolstofdioxide tussen oceaan en atmosfeer. Een klimaatverandering ten gevolge van de astronomische factoren kan leiden tot een omslag in dit evenwicht. Wat er precies gebeurt, is niet duidelijk.

Een verandering in het circulatiepatroon van oceaanwater kan ervoor zorgen dat koud dieptewater invloed heeft op het koolstofdioxide-evenwicht. We kunnen ook denken aan de invloed van grote hoeveelheden koud smeltwater die in de oceaan terugvloeien. Bovendien kan plankton, dat een belangrijke schakel in de koolstofkringloop vormt, een rol spelen.

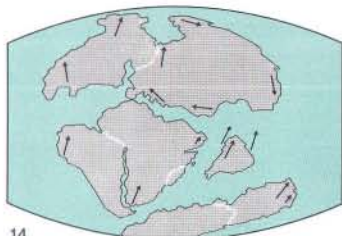
Waarom is het koolstofdioxidegehalte in de atmosfeer van zo'n groot belang? Koolstofdioxide draagt bij aan de mate waarin de atmosfeer als het glas van een broeikas werkt. Een verandering van het overigens lage atmosferische gehalte (circa 0,03%) van dit gas vergroot

het temperatuurverschil tussen een glaciaal en een interglaciaal.

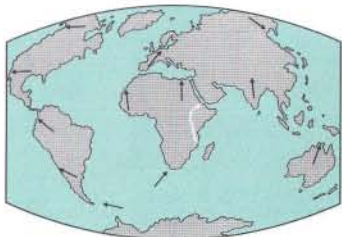
Het onderzoek van de oceaانبodem heeft vele belangwekkende resultaten opgeleverd. Twee van deze resultaten zijn bijzonder verrassend. De zuurstofisotopen in de kalkschalen van foraminiferen wijst op een veel groter aantal vergletsjeringen dan tot op heden bekend was. Ook uit onderzoek van in sedimenten aangetroffen pollen (stuifmeel) blijkt dat het verleden meer glaciale heeft gekend dan we voorheen veronderstelden. Ook is gebleken dat de temperatuurschommelingen plaatsvonden gedurende circa twee en een half miljoen jaar. Er bestaan trouwens meer gegevens die erop wijzen dat de aarde zich sinds twee en een half miljoen jaar in een ijstijdvak bevindt. Dit betekent dat een groot deel van het huidige ijstijdvak in het Pleistocene valt.

De verhouding van de zuurstofisotopen in foraminiferenschalen wijst op een ritmeverandering van de temperatuurschommelingen in het laatste ijstijdvak. Tussen 2,4 en 0,6 miljoen jaar geleden beheersen de schommelingen van de aardas het ritme; er bestaat dan een dominerend ritme met een periode van 40 000 jaar. Tijdens de laatste 600 000 jaar, waarbinnen de grote vergletsjeringen op het noordelijk halfrond plaatsvonden, staan de veranderingen van de ellipsvormige aardbaan op de voorgrond. Hierdoor zijn perioden van 100 000 jaar herkenbaar. Een verklaring voor deze merkwaardige verandering is er op dit ogenblik niet.





14



15

## Antarctica

Antarctica neemt in de geschiedenis van het ijs van de laatste 65 miljoen jaar (het Kenozoïcum) een bijzondere plaats in. De bodem van de omringende Zuidelijke IJsee bevat zand en stukken steen die van het land afkomstig zijn en daar uit wegsmeeltende ijsbergen terecht zijn gekomen. Uit de verspreiding en de ouderdom van zulke afzettingen blijkt dat Antarctica sinds het Mioceen (26 miljoen jaar geleden) met gletsjers bedekt is geweest. Op kleinere schaal was daar al ijs in het Eoceen (55 miljoen jaar geleden). Verwonderlijk is dat niet; Antarctica kreeg in de loop van het Mesozoïcum (225 tot 65 miljoen jaar geleden) een polaire positie, al bleef het verbonden met andere zuidelijke continenten. De bestanddelen van het oorspronkelijke supercontinent *Gondwana* (Zuid-Amerika, Afrika, Australië, Antarctica en het Arabische en het Indiase schiereiland) dreven verder uiteen waardoor Antarctica 65 miljoen jaar geleden geïsoleerd raakte. Daardoor kwam de koude zeestroom rond Antarctica op gang, die het continent afsloot van warme zeestromen.

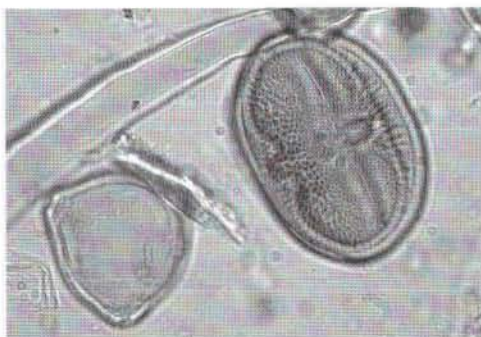
Afgezien van Antarctica zijn er uit het Paleoceen, het Eoceen en het Oligoceen, en uit het Mesozoïcum geen glaciële verschijnselen van enige betekenis bekend. Wij moeten teruggaan tot in het laatste deel van het Paleozoïcum (> 225 miljoen jaar geleden) om opnieuw sporen van uitgestrekte gletsjers te vinden. More-

nen uit die tijd zijn gevonden in Zuid-Amerika, Australië, Afrika en op Antarctica, kortom op het toenmalige supercontinent Gondwana. Dit continent lag op hoge zuiderbreedte en gedurende het laatste deel van het Paleozoïcum was het een 'antarctisch' continent. Langs de randen wisselen morenen af met in zee ontstane afzettingen. Dit wijst op de aanwezigheid van ijs en een wisselend niveau van de zeespiegel. Waarschijnlijk heeft Gondwana gedurende tientallen miljoenen jaren een grote ijskap gedragen.

In Noord-Afrika, Zuid-Amerika en in het zuiden van Europa zijn sporen aangetroffen van ijs dat daar circa 450 miljoen jaar geleden moet zijn geweest. Aanwijzingen voor nog oudere, omvangrijke vergletsjeringen vinden we in landen rond de noordelijke Atlantische Oceaan. Sommige sporen daar zijn 700 tot 1000 miljoen jaar oud. We noemen deze periode het Varanger-ijstijdvak, genoemd naar een van de eerste vindplaatsen in Noorwegen. Of er sprake was van een ononderbroken vergletsjering gedurende dat lange interval, staat niet vast.

## Ijstijden, een bijzonder verschijnsel

Duidelijk is dat de aarde herhaaldelijk grote landschappen heeft gekend. Het algemene klimaatregime van de aarde is de laatste 2,5 miljard jaar niet wezenlijk veranderd. Tussen die ijstijdvakken was de aarde zeer lange tijd geheel, of nagenoeg geheel, ijsvrij.



16

16. Pollenkorrels uit oude aardlagen geven ons inzicht in de toenmalige begroeiing. Bijbehorende

temperaturen tonen aan dat er in het verleden meer ijstijden zijn geweest dan dat we voorheen dachten.





17

Tegen de theorie van Milankovitch is aangevoerd dat, als zij juist is, de hele aardgeschiedenis zou bestaan uit een voortdurende afwisseling van glacialen en interglacialen. Dat is zeker niet het geval. Uit het Mesozoïcum en uit het interval Siluur-Devoon (450 tot 345 miljoen jaar geleden) zijn nauwelijks sporen van landijs bekend. Bovendien is de laatste tien jaar duidelijk geworden dat het ritme van de sterrenkundige factoren zich ook in sedimentatie kan manifesteren, zonder dat het aanleiding tot vergletsjeringen heeft gegeven. Blijkbaar zijn er nog andere factoren die het aardse klimaat beïnvloeden, zodat het astronomische ritme zich op een bepaald ogenblik openbaart als een afwisseling van glacialen en interglacialen.

Vergelijking we de ijstijdvakken aan het einde van het Kenozoïcum (2,5 miljoen jaar geleden tot heden) en aan het einde van het Paleozoïcum (225 miljoen jaar geleden). Het eerste laat grote ijskappen zien op het noordelijk halfrond, terwijl het zuidelijk halfrond — afgezien van Antarctica — slechts gebergtegletsjers laat zien. Ten zuiden van de veertigste breedtegraad zijn er, buiten Antarctica, geen landmassa's van betekenis. Het eerdere ijstijdvak toont een reusachtige ijskap op Gondwana dat dan een polaire positie inneemt. Laurazië lag toen grotendeels op tropische tot subtropische breedten. De ligging van de continenten ten opzichte

17. IJstijden beïnvloeden het landschap sterk. Dit U-vormige dal is ontstaan door de uitschurende werking van een gletsjer.

18. Ook in Nederland heeft het ijs zijn sporen achtergelaten. Op Urk liggen grote zwerfstenen, die in een belangrijk glaciaal sediment (keileem) zijn afgezet.

19. Polygonen zijn sporen van de effecten van warmte en koude op een met ijs bedekte aarde. Dooien en vriezen zorgen voor smeltwater en ijs, met verschillende dichtheden. De watercirculatie die hierdoor ontstaat veroorzaakte deze patronen in de ondergrond.



18

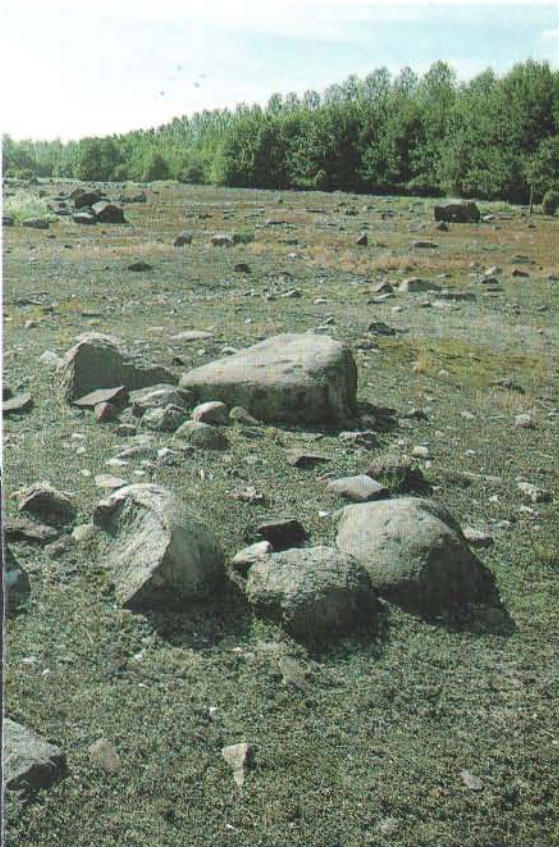


van de klimaatgordels is blijkbaar een punt van betekenis. Bovendien hoeft een polaire positie op zichzelf niet voldoende te zijn om een ijskap te doen ontstaan. De geschiedenis van Antarctica toont dat overtuigend aan.

Toen onderzoekers in de zestiger jaren de theorie van de verschuivingen van de aardkorst ontwikkelden, bleek al spoedig dat tal van verschijnselen in de aardgeschiedenis in verband staan met een ritme in de beweging van de *lithosfeer*, de buitenste schil van de aarde. Supercontinenten vallen uiteen in kleinere continenten, om na verloop van tijd in tegengestelde beweging weer samen te komen. Het ziet er naar uit dat ook het optreden van ijsstijdvakken met grote continentale vergletsjeringen afhankelijk is van deze ritmische bewegingen.

De afname van het aantal oceanen tussen afzonderlijke continenten leidt tot een lage zeespiegel, doordat het volume van de oceaanrug-

gen afneemt. De continenten steken dan grotendeels boven de zeespiegel uit. Het afnemende tempo van de beweging van de lithosfeer zorgt voor een dalende vulkanische activiteit, waardoor er minder koolstofdioxide, een van de belangrijkste vulkanische gassen, in de atmosfeer komt. Een lage zeespiegel en een laag koolstofdioxide-gehalte van de atmosfeer bevorderen beide een aanzet tot een ijstijdvak. Dit gebeurde in het laatste deel van het Paleozoïcum met de vorming van Gondwana en in het laatste deel van het Kenozoïcum met de botsing van Afrika tegen Europa en Azië, en het afnemende tempo van de beweging in de Middenatlantische rug. Deze geologische verschijnselen veranderen slechts langzaam. We mogen aannemen dat het ijstijdvak waar de aarde ongeveer 2,5 miljoen jaar geleden in terecht is gekomen, nog miljoenen jaren zal aanhouden.



19

#### Literatuur

- Shackleton NJ, West RG, Bowen DQ. The past three million years: evolution of climatic variability in the North Atlantic region. Londen: Royal Society, 1988.  
Imbrie J, Imbrie KP. De ijstijd, het raadsel ontsluit. Amsterdam: Standaard Wetenschappelijke Uitgeverij, 1980.

#### Bronvermelding illustraties

- Th. van Kolfschoten, Instituut voor Aardwetenschappen, RU Utrecht: 860-861  
Lars Rodhe, Uppsala, S: 1  
Wil Roebroeks, Instituut voor Prehistorie, RU Leiden: 2, 3 en 4  
Anders Damberg/Geobild, Uppsala, S: 5 en 17  
J.C. Duplessy, CNRS-CEA, Gif sur Yvette, F: 7, 8 en 9  
J. Oerlemans, Rijksuniversiteit Utrecht: 10 en 11  
Archief Rijks Geologische Dienst, Haarlem: 16  
Jan van de Kam, Griendtsveen: 18 en 19

# ANALYSE & KATALYSE

INTEGRATIE VAN WETENSCHAP EN TECHNOLOGIE IN DE SAMENLEVING

Onder redactie van ir S. Rozendaal.

ALVIN WEINBERG:

## KERNENERGIE KOMT TERUG

SIMON ROZENDAAL

'Het geweten van de nucleaire wereld' over de bom, hoe men met tennis een harde service dient te ontvangen, de Franse betalingsbalans, de angst voor heksen en de noodzaak van inherent veilige kerncentrales.

*Kunt u iets over uw levensloop vertellen?*

"Ik trad toe tot het kernenergie-project in het eind van 1941, in Chicago. Ik had net mijn doctorsbul in biofysica behaald en had nooit gedacht dat ik nucleair wetenschapper zou worden. Ik was een van Eugene Wigners assistenten en was betrokken bij het ontwerp van de kernreactoren van Hanford. In 1942 raakte ik ook betrokken bij het ontwerp van de kernreactor van Oak Ridge, de X10. In 1945, voor de oorlog voorbij was, verhuisde ik naar Oak Ridge — de Clinton Laboratories zoals het toen werd genoemd — naar de proeffabriek voor de produktie van plutonium. Nadat Wigner wegging in 1948 werd ik researchdirecteur en in 1955 algemeen directeur. In

1974 ging ik met pensioen en bracht toen een jaar in Washington door, als directeur van het White House Office of Energy Research and Development. Ik was dus in Washington ten tijde van de eerste oliecrisis. Ik kwam in Oak Ridge terug in 1975 om die kleine denktank te leiden die we het Institute for Energy Analysis noemden. Daar bleef ik tien jaar directeur van en nu ben ik een *distinguished fellow* voor de universiteit van Oak Ridge."

"Ik verdeel de helft van mijn tijd aan de diverse boeken waaraan ik werk. Eén is een soort autobiografie. Ook werk ik aan een boek over Eugene Wigner en tenslotte aan een boek dat ik *Science and Trans-science* noem, een verzamel-ling essays."

*Hebt u zich na de oorlog niet misbruikt gevoeld toen bleek dat de Duitsers helemaal niet ver waren met de ontwikkeling van de bom?*

"Nee. Sommige collega's wel maar wij niet. Ik herinner me nog een bijeenkomst, december 1942, in Arthur Comptons kantoor, waar we berekeningen maakten waaruit bleek dat de Duitsers binnen een jaar de atoombom zouden hebben. Vooral Wigner was daardoor gegrepen. Hij was net Hongarije ontvlucht en had achter elkaar het communisme onder Bela Kun en het fascisme aan den lijve ondervonden. Hij werkte bezeten aan de bom die voor hem een sterk anti-fascistische en anti-communistische betekenis had. Mijn gevoelens waren niet zo krachtig maar ik was het wel met hem eens. We hebben nu 45 jaar zonder wereldoorlog achter de rug en dat komt voor een belangrijk deel door de bommen die we toen ontwikkeld hebben."

*Had u in 1941, ten tijde van het beroemde experiment onder leiding van Enrico Fermi in Chicago, het gevoel dat er ge-*



*schiedenis werd geschreven?*

"Er hing opwinding in de lucht. De avond tevoren ben ik met Fermi wezen bowlen en merkte ik dat hij gespannen was. Bij het experiment werden maar vijftig mensen toegelaten en ik was nummer 54. Er werd niemand ziek dus ik mocht er helaas niet in. Het viel me op dat er een groot vertrouwen was dat alles goed zou gaan. Toch was dit nooit eerder gedaan en er bestond een kans dat de boel zou ontploffen. Niemand hield daar echter rekening mee. Alles was door en door berekend en het experiment verliep geleidelijk. Wel stond er iemand klaar met een grote fles cadmiumsulfiet, voor het geval de boel uit de hand zou lopen. Dan moest hij die fles op de grafiethoop gooien."

*Wat doet u tegenwoordig?*

"Ik ben een amateur-tennisser, heel fanatiek. Ik speel bijna dagelijks, ook *singles* af en toe. Wat zegt u? Jammer dat u geen racket bij u hebt. Anders hadden we een wedstrijd kunnen spelen. We hebben *gravel* hier in Oak Ridge. Zag u de US Open? Sampras is buitengewoon maar ik denk dat de strategie van Agassi verkeerd was. Agassi had, net als Borg vroeger, een paar meter achter de *baseline* moeten staan. Je kunt bij *120 miles an hour* niet op de *baseline* staan."

"U bent Nederlander, hè? In een bepaalde zin is het onderwerp kernenergie niet zo belangrijk in uw land. Slechts een procent of vijf van uw elektriciteit komt uit kerncentrales en u hebt aardgas natuurlijk. Importeert u ook elektriciteit uit Frankrijk?"

*Ja.*

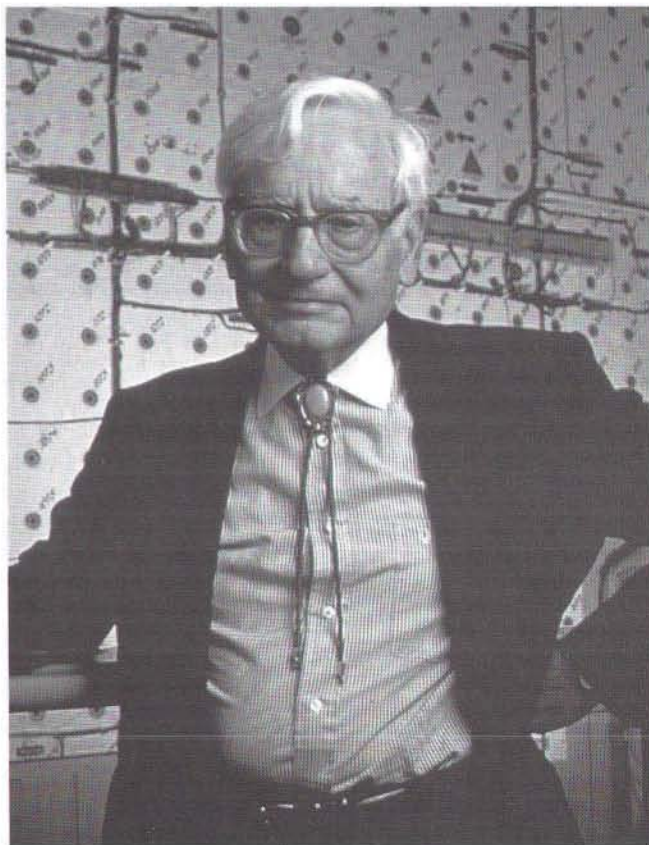
"Waarschijnlijk realiseren de meeste mensen zich niet dat die elektriciteit bovenal nucleair is. De Fransen zijn blonde, nucleair-elektrische Arabie-

ren geworden: ze verdienen goed geld aan de export van energie. Elk land in de omgeving van Frankrijk importeert nu elektriciteit uit Frankrijk. Dat geeft eens te meer aan hoe moeilijk voorspellen is. Veel mensen zeiden destijds dat de Franse nucleaire politiek rampzalig was omdat er een enorme kapitaalsinvestering nodig was. Frankrijk zou bankroet moeten zijn met de 57 reactoren die het nu heeft. Niemand voorzag dat Frankrijk elektriciteit zou gaan exporteren."

*Maar de schuld van Electricité de France, EdF, is wel groter*

*dan van menig ontwikkelingsland.*

"Het hangt er uiteindelijk van af hoe lang die reactoren mee gaan. Een van de bezwaren die vaak tegen kernenergie wordt aangevoerd is dat je de last van kernafval bij toekomstige generaties neerlegt. Maar als de reactoren langer meegaan dan de tijd die nodig is om de schuld af te lossen dan laat je de volgende generatie, je kinderen, je kleinkinderen, niet alleen het kernafval na — een probleem dat volgens de meesten van ons in het vak opgelost kan worden — maar ook goedkope energie. Ik denk dat Frankrijk op den



Alvin Weinberg voor 'zijn' X10-reactor. Elk gat in de reactorwand bevat een brandstofstaaf (foto: Rea Rippey/RBP)



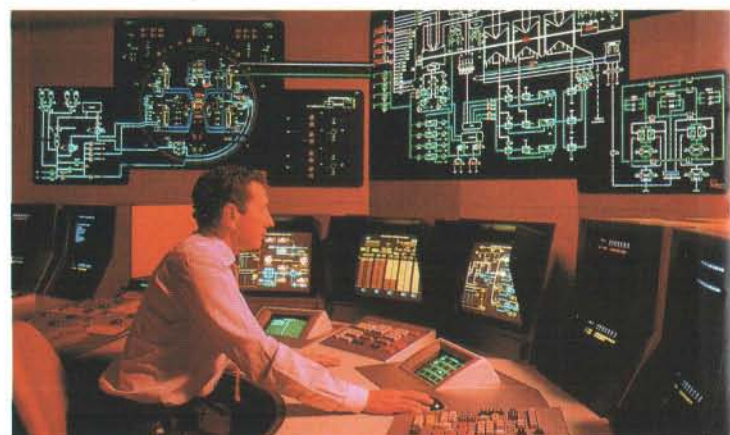
duur dan misschien niet zeer rijk zal worden, maar in elk geval binnen twintig jaar wel een zeer positieve betalingsbalans zal krijgen."

*Nogal wat mensen in Europa zijn bang dat wanneer na 1992 de grenzen min of meer verdwijnen, Frankrijk meer bedrijven zal aantrekken dan andere landen, omdat de elektriciteitsprijs in Frankrijk zoveel lager zal liggen.*  
"Ik denk dat die angst terecht is."

#### Faust

*U heeft in het verleden kernenergie een Faustiaans verbond met de duivel genoemd.*  
"Er hoeft geen twijfel over te bestaan dat kernenergie de samenleving met een aantal problemen opzadelt. De vraag of kernenergie uiteindelijk zal overleven is niet eenvoudig te beantwoorden. Herinnert u zich de laatste regel uit Goethes Faust? 'Voor hem is er redding.' En dan komen de engelen en brengen Faust naar de hemelen. Dat bedoel ik. In een bepaalde zin is kernenergie een Faustiaans verbond maar in elk geval is Faust bij Goethe, niet bij Marlowe, transcendent. Hij overwint uiteindelijk door geloof en dergelijke, en ik denk dat ik uiteindelijk optimistischer ben dan veel critici van kernenergie. Maar u moet wel weten, dat de term 'Faustiaans verbond' dateert van voor Three Mile Island (Harrisburg - SR) en Tsjernobyl. Kernenergie is in de hele wereld een bijna dood onderwerp. De vraag is of het weer levend wordt. Ik denk van wel maar ik weet niet wanneer."

Weinberg manoeuvreert zijn draaistoel piepend naar achteren en pakt weer een boek van hemzelf uit de kast. "Dit is in 1974 gepubliceerd. Toen stel-



den we ons de vraag: stel dat er in 1985 een moratorium is dat 25 jaar aanhoudt, wat zullen daar de gevolgen van zijn? Well, onze conclusies waren dat we dan veel meer steenkool zouden verbranden, dat dat de economie wat zou kosten maar dat we, het ging vooral over de VS, 25 jaar zonder kernenergie zouden kunnen overleven. Het moratorium begon iets eerder dan 1985 maar ik hoop dat het boek profetisch is. Net als dit boek trouwens."

Weer het piepen van de stoel en een volgend Weinbergboek wordt aan de inmiddels redelijk grote stapel toegevoegd. "Dit boek is ongeveer tien jaar later geschreven, eveneens als resultaat van een studie van het Institute for Energy Analysis. Daarin concluderen we dat kernenergie waarschijnlijk weer tot leven komt. Dat bedoelden we met de term *The second nuclear era*."

"Er zijn de laatste twee jaar twee dingen gebeurd die de wedergeboorte van kernenergie volgens mij zeer veel waarschijnlijker maken. Het eerste is natuurlijk dat de wereld opeens het broeikaseffect heeft ontdekt. Dat is nogal grappig want zo'n tien jaar ge-

leden was ons kleine instituut het centrale Amerikaanse studiecentrum voor het broeikas-effect. Dat was voor het broeikaseffect erg populair werd." "In 1975 ben ik met de grafieken van koolstofdioxyde naar allerlei overheidskantoren in Washington toegegaan. Naar het ministerie van energie, de wetenschapsadviseur van de president en nog wat anderen. Ik zei - kijk, dit gebeurt er met koolstofdioxyde en juist nu wordt kernenergie stopgezet,

In een simulator leren technici een kernreactor bedienen. Ze kunnen er zelfs oefenen met grote ongelukken

Frankrijk produceert zijn elektriciteit grotendeels met kernenergie. Hier de kerncentrales van Cattenom, dicht bij de grens met Luxemburg (foto's: Sodel Photothèque EDF)





dat kan niet, je kunt jezelf die optie niet ontnemen."

"Nu het broeikas effect populair is, zie je dat mensen inderdaad opnieuw naar kernenergie kijken. Ik weet niet of daarmee kernenergie de weerstand zal overwinnen, maar de positie van kernenergie wordt een stuk beter. Zelfs de Union of Concerned Scientists (enigszins te vergelijken met een organisatie als de Stichting Natuur en Milieu in Nederland — SR) ziet dit punt bijna. Nog niet helemaal, maar bijna."

#### Wachten in de Sovjet-Unie

"En het andere argument is natuurlijk het Midden-Oosten. Ik weet niet of u zich 1956 nog herinnert, de Suez-crisis. Toen besloot Europa om nucleair te gaan. Drie wijze mannen uit Frankrijk, Duitsland en Italië deden een studie. Ze waren ook een paar dagen in Oak Ridge en praatten met ons over de mogelijkheden die Europa had om aan het eind van de jaren zestig 15 000 megawatt kernenergie te bouwen.

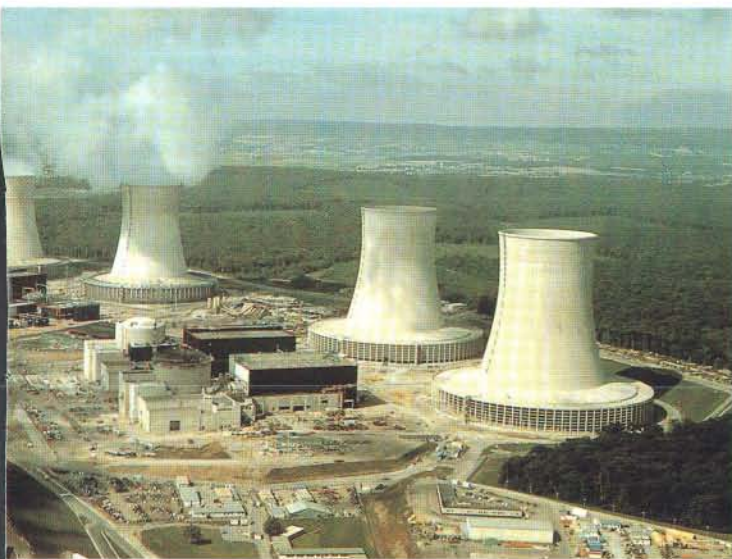
Wij vonden dat een *crazy* doel — Europa ging toen wel heel erg de nucleaire kant op. Toen was Europa enorm afhankelijk van olie voor de elektriciteitsopwekking. Die beslissing van toen heeft de afhankelijkheid van Europa aanzienlijk veranderd. Frankrijk heeft zijn olievraag met een procent of dertig vermindert. En de uitstoot van koolstofdioxide ook met een procent of dertig."

"Een fascinerend aspect in het energievraagstuk is de meedogenloze elektrificatie van de samenleving. Twintig jaar geleden was slechts achttien procent van het primaire energieverbruik in de VS elektriciteit. Nu 36 procent en het neemt nog voortdurend toe. Waarom? Ik veronderstel dat het deels een economische reden is. Elektriciteit was lange tijd erg goedkoop en als je de inflatie er af haalt is elektriciteit nog steeds niet duur.

Maar er zijn meer verklaringen. Elektriciteit heeft aantrekkelijke eigenschappen. Het spaart tijd. Het is makkelijk om een knop om te draaien. Als je bedenkt wat mensen in hun dagelijkse leven het meest waarderen, dan is dat tijd. Bent u wel eens in de Sovjet-Unie geweest? Het valt op dat niemand daar tijd heeft. Waarom? Omdat hun systeem zo verdomd inefficiënt is met al dat wachten in rijen."

"Mijn punt is dat de toekomst van kernenergie nauw verweven is met de toekomst van elektriciteit en dat de trend is om meer en meer elektriciteit te gebruiken. Nu zijn er natuurlijk mensen die zeggen dat dat onverstandig is omdat elektriciteit zelf inefficiënt is bij de oorsprong. Je verliest twee derde van de energie bij het opwekken van elektriciteit. Maar in veel gevallen wordt dat ruimschoots gecompenseerd bij de toepas-

#### Het broeikas effect maakt de wedergeboorte van kernenergie veel waarschijnlijker



sing, het eindgebruik. De industrie realiseert zich dat ook steeds meer. Neem het maken van glas. De traditionele aanpak is om de hitte met aardgas aan te voeren. *Well*, dat is niet erg efficiënt want de warmte komt van de buitenkant en moet naar het midden toe. Met elektriciteit kun je de warmte precies op de goede plek krijgen."

"Er is in de VS een enorme energiebesparing gerealiseerd. De relatie tussen bruto nationaal produkt en energie in de VS is veertig procent hoger dan twintig jaar geleden. De Amerikaanse energieconsumptie was in 1986 even hoog als in 1973. Een belangrijk deel daarvan kan worden



toegeschreven aan de verdere elektrificatie van de samenleving. Op ons instituut zijn er diverse studies geweest die aantonen dat elektriciteit in veel industriële processen een energiebesparende factor is. De doctrinaire energiebespaarders als Amory Lovins houden niet van dit argument. Uit zijn artikelen en boeken blijkt dat hij fundamenteel tegen elektriciteit is, omdat het een gecentraliseerde vorm van energieproductie is en dat vindt hij moreel verkeerd. Daarover kan ik geen commentaar geven maar wel op zijn stelling dat elektriciteit inefficiënt is. Dat klopt niet."

## Inherent veilige kernenergie

"We moeten het tijdperk van het moratorium gebruiken om de nucleaire technologie opnieuw te beschouwen. Ik ben erg onder de indruk van het Zweedse idee voor een inherent veilige reactor, de Pius. Ik denk dat de Pius-reactor veel meer serieuze belangstelling verdient dan ze krijgt."

Weinberg pakt weer een boek uit de kast. Dit keer één van vlak na Harrisburg waar tien *old-timers* uit de Amerikaanse kernenergie bijeen ge-

## ALVIN WEINBERG

### EEN VRIENDELIJKE, SCHERPZINNIGE MAN

bracht waren. "We vroegen ons af of het zin had weer naar *square one* terug te gaan en de technologie zelf ter discussie te stellen. Of er alternatieven voor de gangbare lichtwaterreactoren nodig waren. Het antwoord was ja."

"Het *establishment* — Westinghouse, General Electric, het Department of Energy enzovoort — stelde dat niet erg op prijs. Ingenieurs houden niet erg van nieuwe dingen,

Alvin Weinberg is niet de eerste de beste. Hij werkte in de Tweede Wereldoorlog als net afgestudeerd bio-fysicus onder leiding van Nobelprijswinnaar Eugene Wigner mee in het Manhattan-project — de geslaagde poging om in de VS als eerste een atoombom te ontwikkelen. Eerst in Chicago en later in de geheime stad Oak Ridge ontwikkelde Weinberg reactoren voor de productie van plutonium. Na de oorlog kreeg Weinberg de leiding van de researchafdeling van het Oak Ridge National Laboratory, een immens complex (zoïets als TNO, Kema en ECN samen). Later werd Weinberg er algemeen directeur. Na een kort verblijf in Washington, als energie-adviseur in het Witte Huis, richtte hij een soort energie-denktank op, het Institute for Energy Analysis.

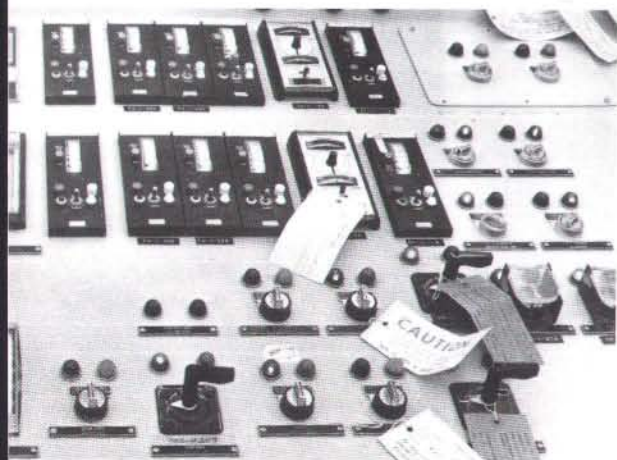
Weinberg heeft veel invloed gehad. In zekere zin is hij de geestelijk vader van de huidige kernenergie. De bestaande kerncentrales zijn lichtwater-reacto-

omdat er altijd onplezierige verrassingen zijn. Mede daarvoor maak ik geen deel meer uit van het nucleaire *establishment*. Ze mochten me toch al niet zo erg en dit was een nieuwe reden om me niet te mogen. Ik ben *in a way* zoïets als het geweten van het nucleaire *establishment*. In dat verband moet u weten dat ik het was die destijds admiraal Rickover overhaalde om de lichtwater-reactor te gebruiken voor onderzeeboten."

## Moest u admiraal Rickover over de streep trekken?

"Ja. Rickover bracht een jaar in Oak Ridge door om het vak te leren. Dat was in 1946 toen we hier een school hadden. Hij kwam hier naar toe met zijn jongens. Rickover was een buitengewoon iemand. Verschrikkelijk in een bepaalde zin, hij had van grofheid een techniek gemaakt. Afgrijpselijk. Desalniettemin konden we redelijk met elkaar opschieten. In die tijd zei hij dat hij geen drukwaterreactor wilde, want de thermische efficiëntie van 15 à 16 procent

Hier ging het in 1979 mis met 'Harrisburg' en met de kernenergie. Toen zeven jaar later Tsjernobyl volgde, leek het einde van het nucleaire tijdperk in zicht (foto: Metropolitan Edison)





ren en sterk gebaseerd op een type dat Weinberg samen met admiraal Rickover voor de Amerikaanse marine ontwikkelde.

Later stuurde Weinberg vanuit Oak Ridge, de niet langer geheime stad in Tennessee waar hij nog steeds woont, voortdurend studies over het energieprobleem en over kernenergie de wereld in. Studies, die internationaal gezaghebbend waren. De veelgebezigde uitdrukking dat kernenergie een Faustiaans verbond met de duivel is, komt van Weinberg. Ook was hij een van de eerste voorstanders van inherent veilige kerncentrales (in 1984 schreef hij in *Science* een artikel met de titel *Inherently safe reactors and a second nuclear era*).

Ook zijn bespiegelingen over hoe je grote onderzoeksinstituten moet leiden, hebben internationaal navolging gekregen. De Amsterdamse hoogleraar natuurkunde Frans Saris, die zelf een instituut leidt: "Nog steeds gaan veel opvattingen over weten-

schaps- en onderzoeksbeleid terug tot het pionierswerk van Weinberg."

Weinberg is een vriendelijke, scherpzinnige man met wit haar. Als ik hem op een zaterdagmorgen tijdens de Amerikaanse nazomer — de *Indian Summer* — ontmoet, heeft hij een wit windjack aan en een onvervalst Amerikaanse schoenveter-stropdas. De 76-jarige heeft een erepositie in Oak Ridge. Mede daarom mag Weinberg nog steeds gebruik maken van een werkruimte in het medische instituut. Voortdurend pakt hij uit de boekenkast boeken die hij zelf heeft geschreven. Later voegt hij nog diverse kopieën van eigen artikelen toe, die in een aparte archiefkast op een gang buiten zijn werkkamer worden bewaard. "Heeft u wat te lezen in het vliegtuig."

was te laag. Ik zei — Rick, in hemelsnaam, het laatste waar je je in een onderzeeboot druk over hoeft te maken is de thermische efficiëntie. Je moet iets hebben dat simpel is en betrouwbaar kan worden gemaakt. Sommige van zijn jongere mannen haalden hem

*Hoe zou kernenergie terug kunnen komen?*

"In mijn recente artikelen betoog ik dat de sleutel voor een succesvolle terugkeer van kernenergie in democratieën — en alles wordt tegenwoordig een liberale democratie — de overtuiging van de publieke

ginia toe. Dat was buitengewoon. Hij was altijd een krachtig tegenstander van kernenergie en is in het licht van het broeikas-effect bereid opnieuw naar kernenergie te kijken. Als kernenergie gebaseerd zou kunnen zijn op de nieuwe generatie van inherent veilige reactoren, wil Ehrlich kernenergie zelfs omhelzen. Dat is een belangrijke concessie van een zeer invloedrijke *anti-nuke*. Meer leden van de skeptische elite gaan nu in de richting van zijn opvatting. Dan zullen ook de mensen in de media iets anders tegen het onderwerp aankijken en dan zou het weer een onderwerp voor publieke discussie kunnen worden."

"De angst voor radioactiviteit is enigszins vergelijkbaar met de angst voor heksen in de vijftiende en zestiende eeuw. Zodra de intelligentsia ervan overtuigd raakte dat heksen niet bestonden was het afgelopen met het verbranden van heksen. Zo zou het nu ook kunnen gaan met de angst voor radioactiviteit. Ik zal dat waarschijnlijk niet meer mee-

### **"De angst voor radioactiviteit is vergelijkbaar met de angst voor heksen in de vijftiende en zestiende eeuw"**

toen over en zo is het tijdperk van de drukwaterreactor begonnen."

*Het nucleaire establishment beschouwt het aanprijzen van inherent veilige kerncentrales als Pius en de MHTGR als anti-nucleair.*

"Dat zeggen ze, ja. Maar ik ben het met dat argument niet eens. Kijk eens naar de luchtvaart. Het is buiten kijf dat een Boeing-747 veiliger is dan een DC-3. Een straalmotor is betrouwbaarder dan een zuigermotor. Toch bestaan beide vliegtypen naast elkaar."

opinie is. En daarvoor moet eerst de wat ik noem 'skeptische elite' overtuigd worden." "Over de skeptische elite gesproken, kent u Paul Ehrlich? Weet u wel, van *The population bomb* en andere boeken? Hij is een van de belangrijkste milieu-activisten in de VS. Hij en ik hadden een jaar geleden een discussie over het broeikas-effect. Ik zei dat er in het licht van het broeikas-effect naar de nieuwe ontwerpen van kerncentrales moest worden gekeken. Paul Ehrlich gaf dat voor een gehoor van vijftienhonderd studenten in Vir-



maken, maar ik sluit het niet uit."

*U hebt zelf aangegeven dat de ontwikkeling van kernenergie deels bepaald is door de militaire motieven. Is dat nog steeds zo?*

"In de VS wel. Zoals u weet hebben thermonucleaire wapens tritium nodig en tritium heeft een halfwaardetijd van elf jaar. De reactoren in Savannah River die tritium produceren zijn tamelijk oud en moeten vervangen worden. Enkele weken geleden heeft het Department of Energy aangekondigd twee nieuwe reactoren te gaan bouwen. Een daarvan is een gemoderniseerde versie van de zwaarwater-reactoren die veertig jaar geleden al in Savannah River werden gebouwd. De andere is interessant. Ik zat in de commissie die de aanbevelingen heeft gedaan. Sommige van ons zeiden: 'dit is de enige kans in Amerika om een inherent veilige kernreactor te bouwen. Dit is een kans om de technologie te demonstreren.' Dus het Department of Energy heeft besloten een Modulaire Hoge Temperatuur Gasgekoelde Reactor, een MHTGR, te ontwerpen en te bouwen. Sommige mensen zullen zeggen dat dat de *kiss of death* is. Dat geloof ik niet."

*Maar zullen die nieuwe tritiumreactoren wel gebouwd worden, gezien het feit dat de wereldsituatie minder explosief wordt en er in de toekomst wellicht minder behoefte aan kernwapens zal bestaan?*

"Ik weet het niet. Wellicht zal er geen behoefte meer bestaan aan de tienduizenden offensieve atoomkoppen, maar uiteindelijk zullen de *superpowers* toch behoefte blijven houden aan enkele honderden defensieve atoomwapens. Dat is wellicht de enige manier om

superioriteit te behouden over mensen als Saddam Hussein."

*Speelt bij de ontwikkeling van de inherent veilige reactoren het militaire argument, het nut voor bommen, ook een rol?*

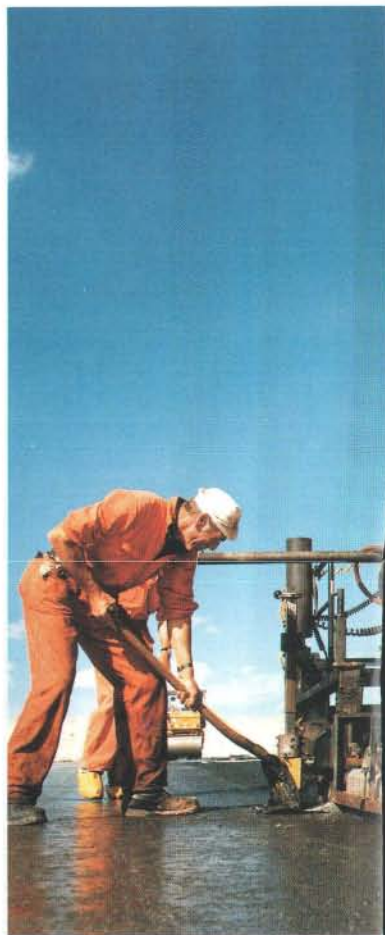
"Kerncentrales hebben geen noodzakelijke relatie met atoomwapens. Als Irak plutonium wil, dan krijgt Irak plutonium. Hoe? Ik heb het regeringsdocument herlezen dat de Israëli's uitbrachten na de aanval op de Frans-Irakese Osiris-reactor (een onderzoeksreactor in aanbouw — SR). In die tijd was ik zeer tegen wat de Israëli's hadden gedaan. Ik vond dat ze krankzinnig waren geworden en zei: 'jullie hebben het principe gevestigd dat het *okay* is om kernreactoren te bombarderen. Jullie hebben zelf reactoren die radioactief zijn en straks bombarderen de Iraki's jullie reactoren.' Ik zei toen ook dat de Iraki's helemaal geen plutonium in hun reactor hoefden te produceren. Ze hadden immers al hoogverrijkt uranium van de Fransen gekregen en als ze een atoombom wilden konden ze dat uranium gebruiken."

"Bij nader inzien geloof ik dat ik het toen verkeerd had. Ik denk dat het mogelijk is om in zo'n Osiris-reactor clandestien vijf à tien gram plutonium per dag te maken. Dat betekent dat je eens in de zoveel jaar een bom kunt maken. Heel snel heb je tien bommen, dertig bommen, enzovoort. Ik las met belangstelling dat Saddam nu een ultracentrifuge heeft. Je hebt geen elektriciteitsproducerende kerncentrales nodig voor atoombommen. Kijk naar Pakistan, kijk naar Israël."

Joost van Kasteren

## DE OPMERKELIJKE

Met moeite kunnen de ruitewissers het aan. Zelfs in de hoogste stand is de weg onzichtbaar als we een vrachtwagencombinatie inhalen, zoveel water spat er op. Ik richt me op de vangrail en op de oplichtende berm paaltjes, want de strepen op het wegdek zijn onzichtbaar in de plassen.





## GESCHIEDENIS VAN

## ZOAB

Plotseling is het opspattend water verdwenen. De ruitewisser kan weer naar zijn lage stand, de strepen zijn weer zichtbaar. De oorzaak van deze verandering is niet een plotselinge weersomslag, maar een plotselinge verandering van wegdek. Dat is van dicht asfaltbeton (DAB) veranderd

in zeer open asfaltbeton (ZOAB).

Na afweging van alle voor- en nadelen, heeft de minister van Verkeer en Waterstaat een paar jaar geleden besloten dat op wegvakken waar meer dan 35 000 voertuigen per etmaal rijden ZOAB moet worden toegepast als deklaag. Verder

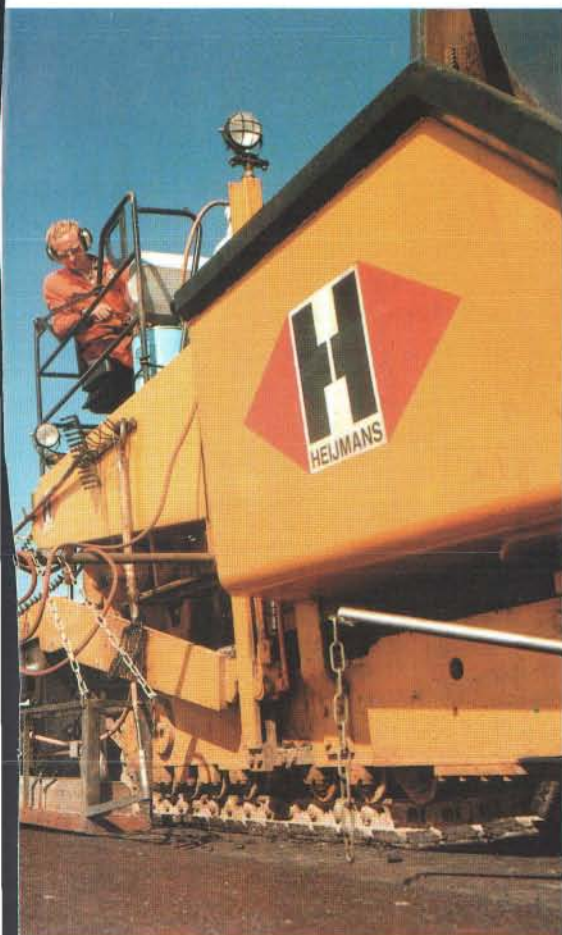
wordt een ZOAB-deklaag aangebracht op die plekken waar 'discontinuïteiten' tot extra overlast door opspattend water leiden. Daarbij moeten we bijvoorbeeld denken aan rijstroken waar het verkeer voor verschillende richtingen moet in- en uitweven. Ten slotte wordt ZOAB toegepast op die plekken waar vermindering van verkeerslawai noodzakelijk is.

De vervanging van DAB door ZOAB gebeurt als er aan de betreffende weg groot onderhoud moet wordend gepleegd; als de deklaag toch al moet worden weggefreest. In plaats van DAB wordt er dan ZOAB neergelegd. De vervanging met ZOAB gebeurt nu in een tempo van 2,5 vierkante kilometer per jaar. Dat komt overeen met een kleine 100 kilometer autoweg per jaar.

Een belangrijk kenmerk van zeer open asfaltbeton of ZOAB is dat hemelwater snel wordt afgevoerd. Ir Jan Swart werkt bij de Dienst Weg- en Waterbouw van Rijkswaterstaat in Delft. "ZOAB verschilt van gewoon dicht asfaltbeton, DAB, doordat de korrels in het asfalt bijna allemaal dezelfde grootte hebben, dezelfde *gradering* in wegebouwtermen. Bovendien bevat ZOAB veel minder bitumen. Eigenlijk alleen een huidje om de steentjes heen. Het gevolg is dat ZOAB bestaat uit een steenskelet, aan elkaar gekit door bitumen. DAB daarentegen bestaat uit een bad van bitumen waarin de steentjes zwemmen."

Het gevolg van dat verschil in structuur is dat ZOAB vrij grote holle ruimtes bevat die onderling met elkaar zijn verbonden. Regen op een deklaag van ZOAB zakt daarom meteen naar beneden en stroomt vervolgens over de onderlaag van dicht beton naar de zijkant van de weg.

Jaarlijks wordt van honderd kilometer autoweg de deklaag vervangen door zeer open asfaltbeton (foto: Heijmans BV, Rosmalen)



Tijdens een forse regenbui fungeert de vijf centimeter dikke deklaag van ZOAB dus in feite als een tussenopvang voor het water, dat vervolgens naar de zijkant afstroomt.

Een ander voordeel van ZOAB is dat er minder spoorvorming optreedt. Bij DAB zwemmen de steentjes als het ware in de bitumen. Vooral als het warm wordt, moeten we dat zwemmen bijna letterlijk nemen. Als gevolg van de wioldruk worden steentjes en bitumen weggedrukt waardoor sporen ontstaan.

Swart: "Als het regent blijft bij DAB het water in die sporen staan. Gevolg daarvan is dat het slipgevaar als gevolg van *aquaplaning* toeneemt." Aquaplaning is het verschijnsel waarbij het contact tussen band en wegdek is verbroken door een laagje water. De auto zweeft als het ware over de weg en wordt onbeheersbaar. Bij ZOAB is dat gevaar van aquaplaning eigenlijk niet aanwezig. Niet alleen blijft het water niet staan; er treedt ook vrijwel geen spoorvorming op. Een van de redenen waarom er nauwelijks spoorvorming optreedt is omdat ZOAB in de zomer niet zo heet wordt als gewoon DAB. Door de zuigende werking van de banden ontstaat een soort natuurlijke ventilatie in de poriën en blijft niet alleen de deklaag, maar ook de onderliggende laag asfaltbeton vrij koel. Diezelfde natuurlijke ventilatie als gevolg van passerende autobanden zorgt ervoor dat de poriën van zeer open asfalt niet volledig dichtslibben met allerlei rommel.

Naast het verbeterde zicht bij regen en de kleinere kans op slippen, heeft het gebruik van ZOAB ook tot gevolg dat het lawaai van het autoverkeer er flink door wordt gereduceerd. Op autosnelwegen, waar gemeenlijk harder dan 80 km

Op een weg met een gewone deklaag is het 'splash-and-spray-effect' van een buitje aanzienlijk. Van ZOAB spat vrijwel geen water op (foto: Piet den Blanken/Hollandse Hoogte)



per uur wordt gereden, is die reductie in de orde van grootte van 3 dB(A), van 77 naar 74 dB(A). Omdat geluid op een logaritmische schaal wordt uitgezet, betekent dat bijna een halvering van de geluidshoeveelheid.

ZOAB heeft dus vele voordelen, zowel op het gebied van de verkeersveiligheid — het voorkomen van *splash and spray* — als op het gebied van het milieu, namelijk de bestrijding van lawaai. Het materiaal heeft echter ook nadelen.

Het grootste nadeel is dat het duurder is. Een gewone DAB-deklaag moet eens in de tien à vijftien jaar worden vervangen; een deklaag van ZOAB eens in de acht tot tien jaar. ZOAB veroudert sneller dan DAB, omdat de binder, het bitumen, door de open structuur over een groter oppervlak oxydeert.

### Glijpartijen

ZOAB vindt zijn oorsprong in de Verenigde Staten. De eerste vermeldingen in de literatuur dateren uit de jaren zestig. Vermoedelijk is het materiaal voor het eerst gebruikt op vliegvelden en dan met name militaire vliegvelden, omdat daar onder alle weersomstandigheden gestart en geland moet kunnen worden.

Voor de Nederlandse wegenbouw is Groot-Brittannië de bakermat van ZOAB. J. van Gorkum van CROW (Stichting Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en Verkeerstechniek) herinnert zich dat begin jaren zeventig een werkgroep werd opgericht van het Studiecencentrum Wegenbouw, de voorloper van het CROW. Die werkgroep, waarin mensen van de





naar Engeland zijn gegaan, omdat het Road Research-laboratorium daar een aantal wegvakken had aangelegd met een deklaag van ZOAB." Een tweede werkgroep werd ingesteld om specifiek de mogelijke voordelen van ZOAB voor de verkeersveiligheid te onderzoeken. Dat was rond 1972, bijna twintig jaar geleden dus. In het kader van het onderzoek werd een eerste proefvak aangelegd op de provinciale weg Ede-Apeldoorn, daar waar deze de A1 kruist ter hoogte van het wegrestaurant De Cantharel. Er volgden er meer. Uit oogpunt van verkeersveiligheid bevielen die proefvakken uitstekend. Het verkeer had weinig of geen last meer van opspattend water, terwijl tegelijkertijd het slipgevaar sterk was gereduceerd.

Van Gorkum: "Niets leek toepassing van ZOAB op grotere schaal in de weg te staan. Tot

zich bij de gladheidsbestrijding.

Normaliter wordt preventief zout gestrooid in een bepaalde hoeveelheid per vierkante meter wegdek. Voor ZOAB bleek die standaardhoeveelheid per meter te gering. Om een stuk ZOAB ijsvrij te houden heeft men, zo weten we nu, bijna anderhalf keer zoveel zout nodig. Omdat de korte stukken ZOAB indertijd onder hetzelfde regiem voor gladheidsbestrijding vielen als het DAB, werden juist die stukken eerder glad, zonder dat de wegbeheerder dat in de gaten had.

Achteraf is de verklaring logisch, maar in die tijd had ZOAB als gevolg van de ongevallen en glijpartijen afgedaan. In heel West-Europa was men zo geschrokken, dat het materiaal voor lange tijd onbespreekbaar was bij wegbeheerders. In Denemarken werd toepassing ervan zelfs

overheid en van de aannemers zitting hadden, deed onderzoek naar allerlei vormen van asfaltdeklagen. Daarbij heeft men vooral gekeken naar de vraag in hoeverre veranderingen in de ruwheid van het oppervlak van invloed waren op de stroefheid van het wegdek. Van Gorkum: "Die werkgroep heeft een aantal texturen bestudeerd. De ene categorie bestond uit texturen die worden bepaald door de afgestrooide steen die op de deklaag wordt aangebracht. Een voorbeeld daarvan zijn de in bitumen gedrenkte steentjes die over de deklaag worden uitgestrooid en ingerold, de *precoated chippings*."

"De andere texturen waren inherent aan het asfaltmengsel dat wordt gebruikt. Je komt dan uit bij dicht, open en zeer open asfalt. Ik herinner me dat leden van de werkgroep toen

**In de winter van '78/'79 gebeurde het regelmatig dat automobilisten van de weg afraakten, juist op de stukken waar ZOAB lag. Het leek alsof ZOAB de oorzaak was**

de strenge winter van 1978/'79." In die winter gebeurde het regelmatig dat automobilisten van de weg afraakten, juist op de stukken waar ZOAB lag. Het leek alsof die ongelukken werden veroorzaakt door het zeer open asfaltbeton.

Die glijpartijen waren volgens Van Gorkum echter niet te wijten aan ZOAB op zich. Wel aan het feit dat er op vele kilometers DAB slechts korte stukken — proefvakken ten slotte — ZOAB lagen. ZOAB vormde een discontinuïteit in het wegvak en dat wreekte

verboden. Van Gorkum: "Ik herinner me dat ik begin jaren tachtig meehielp met de organisatie van twee workshops, een nationaal en een internationaal. Op die workshops hoorde ik vrijwel alleen maar negatieve geluiden over ZOAB."

#### **Hand in het vuur**

Begin jaren tachtig deed zich echter een nieuwe ontwikkeling voor. ZOAB bleek het rolgeluid van de banden van een hardrijdende auto sterk te verminderen. Degene die dat



aspect onder de aandacht bracht van het ministerie van VROM was wegenbouwmij. J. Heijmans uit Rosmalen.

Ing Piet de Groot, hoofd kwaliteitsdienst van Heijmans: "In het begin jaren tachtig werden we door Esso gewezen op de mogelijkheden van rubberbitumen. Dat is bitumen dat is vermengd met oud rubber van autobanden. Dat is beter dan ZOAB als het gaat om geluidreductie." De reden daarvan is niet, zoals de meeste mensen

Via het ministerie van VROM kwam ook de gewone ZOAB weer onder de aandacht van het ministerie van Verkeer en Waterstaat, in casu Rijkswaterstaat. Waar VROM vooral aandacht had voor de geluidreducerende eigenschappen, kreeg bij Rijkswaterstaat vooral het aspect verkeersveiligheid weer aandacht. Vermindering van *splash and spray* (spat- en stuifwater) zou een vergroting van de verkeersveiligheid betekenen.

**De automobilist zal het een zorg zijn, zolang die op een natte ZOAB-deklaag maar even hard kan blijven rijden als op een droog wegdek.**

denken, de dempende werking van het rubber. De Groot: "Waar het om gaat is dat het toevoegen van rubber een betere binder geeft. Dat betekent dat je een nog eenvormiger soort steentjes kunt gebruiken en dat levert weer een grotere eenvormigheid in de poriën van het asfalt op. Bovendien neemt het poriënvolume toe van twintig procent bij gewoon ZOAB tot 25 procent bij rubberasfalt."

"Het rubber heeft dus vooral als functie het veredelen van je bindmiddel, je bitumen. Rubberasfalt heeft bovendien een langere levensduur dan gewoon ZOAB."

Het idee van rubberasfalt viel bij het ministerie van VROM in goede aarde. Een eerste proefvak werd aangelegd bij het dorp Zeeland in Noord-Brabant. De meerkosten van rubberasfalt waren voor rekening van het ministerie. Geluidmetingen leerden dat er inderdaad sprake was van een reductie van het verkeerslawaai met circa 3 dB(A).

Bovendien was men er inmiddels achter dat de ongevallen in de winter van '78/'79 niets met ZOAB en alles met een onaangepast strooi beleid hadden te maken.

De keuze voor ZOAB is voorafgegaan door een uitgebreid proces, waarin kosten en baten werden afgewogen. Bij Rijkswaterstaat zat men nogal aan te hikken tegen het verschil tussen ZOAB en DAB, van ongeveer f 1,50 (30 F) per vierkante meter asfalt. Dat verschil wordt vooral veroorzaakt door het verschil in levensduur en daarmee de kosten voor groot onderhoud. Daar stond weliswaar een vergrote verkeersveiligheid tegenover, maar dat moest op een of andere manier hard worden gemaakt.

"Wat men heeft gedaan", aldus Swart van DWV/Rijkswaterstaat, "is een vergelijking maken van het aantal ongevallen op een nat en op een droog wegdek, beiden van DAB. De achterliggende veronderstelling is dat een nat

ZOAB-wegdek wat stroefheid betreft vergelijkbaar is met een droog DAB-wegdek."

Of die hypothese klopt tot drie cijfers achter de komma, daarvoor durft Swart zijn hand niet in het vuur te steken. Aan de andere kant is de veronderstelling ook weer niet helemaal uit de lucht gegrepen, meent hij, omdat het wegdek van ZOAB, behoudens de zeldzame wolkbreuk, vrij droog blijft.

Van de ongevallen op nat en droog wegdek zijn gegevens voorhanden. Op basis van de gemiddelde kosten van een ongeval, die uitgerekend zijn door McKinsey, kan men vervolgens de schade als gevolg van een nat wegdek uitrekenen. De gemiddelde kosten van een ongeval met alleen materiële schade bedragen 3900 gulden; vallen er ook gewonden en doden te betreuren, dan lopen de kosten per ongeval op tot 39 000 gulden. Op deze manier berekend le-





vert ZOAB een jaarlijkse besparing op van zo'n 90 miljoen gulden. Omdat niet overal ZOAB komt te liggen en vanwege de onzekerheden in de veronderstelling, heeft men de besparingen op ongevallen globaal gehalveerd, zodat men is uitgekomen op 50 miljoen gulden per jaar aan de batenkant van ZOAB.

Voor de doorstroming van het verkeer heeft men eenzelfde sommetje gemaakt. Gebruik van ZOAB leidt ertoe dat de opstoppen die nogal eens voorkomen bij regenval, uitblijven. Die opstoppen zijn namelijk niet te wijten aan het feit dat iedereen de auto pakt als er een druppeltje valt, maar aan verandering van het rijgedrag van al aanwezige automobilisten. Met ZOAB verandert dat rijgedrag niet, opstoppen blijven uit en de besparing die dat oplevert is geschat op 25 miljoen gulden per jaar.

Bij elkaar komen de baten van

ZOAB, exclusief geluidreductie en eventueel minder kilometers geluidscherm, dus op 75 miljoen gulden per jaar.

De meeste ongevallen doen zich voor op drukke gedeelten van het nationale wegennet. Zeker bij regenbuien ontstaan juist daar slippartijen met alle, soms noodlottige gevolgen vanden. De verkeersveiligheid zou dus, zo luidde de redenering, al een flink stuk kunnen worden verhoogd als we DAB op de drukke weggedeelten vervangen door ZOAB.

Als criterium voor 'druk' werd 35 000 voertuigen per etmaal aangehouden. Dat komt overeen met 39 vierkante kilometer asfalt. De meerkosten van ZOAB bedragen bij een dergelijk oppervlak 45 miljoen gulden per jaar.

#### Krakkemikkig

Uiteindelijk blijkt dus toch weer de verkeersveiligheid

doorslaggevend bij de (her)introductie van ZOAB in Nederland. De reden is dat het beleid van het ministerie van Verkeer en Waterstaat er expliciet op is gericht om het aantal verkeersongevallen terug te brengen. Om die reden heeft men de kosten van ZOAB ook afgewogen tegen de baten van een besparing op ongevallen. Hoe krakkemikkig die vergelijking ook is.

De ontwikkeling die heeft geleid tot grootschalige toepassing van ZOAB, is de afgelopen twintig jaar nogal springerig verlopen. Het eerste enthousiasme was vooral gebaseerd op de eigenschappen van ZOAB voor de verkeersveiligheid. Die eerste aanzet werd ondersteund door rijks-waterstaat, provincies en wegenbouwers, via het Studiecentrum Wegenbouw.

Nadat ZOAB in ongenade was gevallen, als gevolg van de strenge winter van 1978/'79, was er een op het gebied van asfalt en wegenbouw volstrekt onervaren ministerie — VROM — voor nodig, om samen met een slimme aannemer ZOAB weer op de agenda van opdrachtgevers en aannemers in de wegenbouw te krijgen. Toen het eenmaal daarop terecht was gekomen, volgden de berekeningen die de toepassing ervan uit oogpunt van kosten en baten aantrekkelijk maakten. Berekeningen waarin weer een hoofdrol is weggelegd voor de verkeersveiligheid, niet voor de geluidreductie. Inmiddels loopt Nederland voorop in Europa als het gaat om toepassing van ZOAB als deklaag voor wegen.

En de automobilist? Die zal het een zorg zijn, zolang hij op een natte ZOAB-deklaag maar even hard kan blijven rijden als op een droog wegdek.



In stedelijke gebieden — waar auto's niet zo hard rijden — zijn de automotoren de grootste bron van verkeerslawaaï. Rubberasfalt blijkt in staat een groot deel van dat geluid te absorberen (foto: Heijmans BV, Rosmalen)



# SIMULATICA

Prof dr  
H. Lauwerier

## Chaos in de groei

In 1976 verscheen in het tijdschrift *Nature* een opmerkelijk artikel van de Australische fysicus Robert May, waarin hij de aandacht vestigde op het merkwaardige gedrag van een eenvoudig wiskundig model. May had een grote belangstelling voor biologische problemen en hij hield zich in het bijzonder bezig met modellen van geremde groei. Men kan er onder andere uitvoerig over lezen in het bekende boek over Chaos van James Gleick. Zo beschouwde May het model:

$$x_{n+1} = ax_n(1 - x_n),$$

waarbij  $x_n$  het relatieve aantal individuen in een populatie beschrijft van de  $n$ -de generatie. Daarbij is aangenomen dat de soort zich seizoensgewijze voortplant, bijvoorbeeld in een vaste periode per jaar. We kunnen daarbij denken aan insecten als vliegen of, als voorbeeld van een hogere diersoort, aan vissen. De variabele  $x$  heeft de betekenis van een fractie, een getal tussen 0 en 1. In werkelijkheid kan het gaan om een populatie van miljoenen individuen. We stellen ons even voor dat we beginnen met een kleine waarde van  $x$  voor  $n=0$ : het introduceren van een nieuwe populatie in een nog onge-rept gebied. De factor  $1 - x_n$  kunnen we wel vergeten zolang  $x_n$  erg klein is. Het gereduceerde groeimodel,  $x \rightarrow x$ , beschrijft dan exponentiële, ongeremde groei, wanneer tenminste de factor  $a$

groter is dan 1. Maar zodra  $x$  in relatieve maat vergelijkbaar wordt met 1 gaat de tweede factor,  $1 - x$ , steeds zwaarder meetellen. De groei wordt kennelijk afgeremd en wel des te sterker naarmate  $x$  dichter bij 1 komt. Het model  $x \rightarrow ax(1-x)$  beschrijft derhalve voor  $a > 1$  geremde groei. De maximale waarde van het rechterlid is  $a/4$ . Hieruit volgt dat de toegelaten waarden voor  $a$  niet groter dan 4 mogen zijn. Het model wordt wel naar Verhulst genoemd, een Belgische wiskundige uit de vorige eeuw. Het werkelijk door Verhulst beschreven model is eigenlijk een differentiaalvergelijking welke zogenaamd continue groei beschrijft. Wanneer  $a$  tussen 0 en 1 ligt, beschrijft het bovenstaande model het uitsterven van een populatie. Op wiskundige wijze ziet men dat gemakkelijk in, doordat het model in dat geval steeds voldoet aan  $x_{n+1} < ax_n$ .

May experimenteerde, misschien met een eenvoudige pocketcalculator, met telkens hogere waarden voor  $a$ . Tot aan  $a=3$  stelde zich in het model telkens een stabiele limietsituatie in. In biologische termen zou men kunnen zeggen dat voor  $1 < a < 3$  het milieu voor de gegeven soort een stabiel evenwicht toelaat. Dat evenwicht is overigens  $1-1/a$ . Wanneer  $a$  echter de grenswaarde 3 overschrijdt wordt het evenwicht instabiel en stelt zich in plaats daarvan een soort heen en weer springend evenwicht in, een zogenaamde limietcyclus met periode 2. Het verschijnsel dat bij de verandering van een parameterwaarde een limietsituatie instabiel wordt en plaats maakt voor een andere wel stabiele limietsituatie, heet *bifurcatie* (van *furca* = vork in het Latijn). Bifurcaties komen overal in de natuurwetenschappen voor, bij faseovergangen in de natuurkunde bijvoorbeeld. Nieuw voor May en zijn tijdgenoten was, dat reeds heel eenvoudige wiskundige modellen een verrassende rijkdom aan bifurcatieverschijnselen konden laten zien.

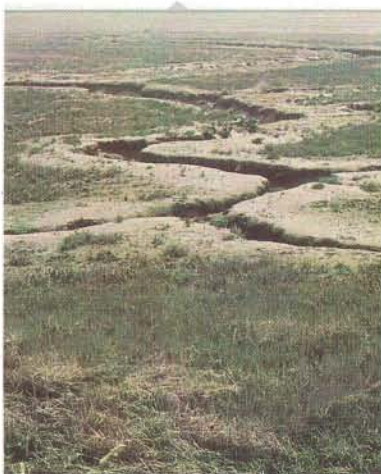
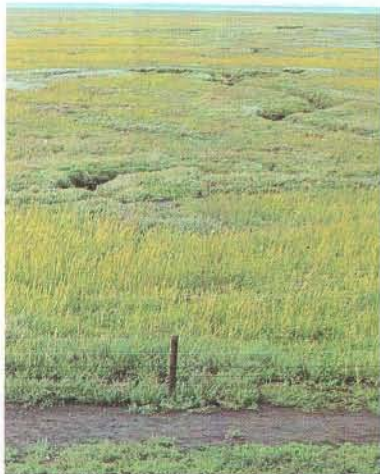
```
10 REM ***ITERATIE VAN A*X*(1-X) VOOR
   GEKOZEN WAARDE VAN A
20 REM ***NAAM:MAY1
30 CLS : SCREEN 9
40 INPUT "A = ",A
50 INPUT "AANTAL ITERATIES = ",NMAX
60 WINDOW (-10,-.3)-(NMAX+10,1.3) : CLS
70 LOCATE 2.2 : PRINT "A =";A
80 X=.1 : LINE (0,0)-(0,X)
90 FOR N=1 TO NMAX
100 X=A*X*(1-X)
110 LINE (N,0)-(N,X)
120 NEXT N
130 BEEP : AS=INPUT$(1) : END
```



Met het programma MAY1 kunnen we een van zijn experimenten op de computer navolgen. We maken daarin een  $n, x$ -diagram, waarbij we horizontaal  $n$  en verticaal  $x$  tegen elkaar uitzetten. De waarde van  $a$  kunnen we van te voren vrij kiezen als inputwaarde. Het maximaal te kiezen stappen  $n_{\max}$  kan ook vrij gekozen worden. Aanbevelens-

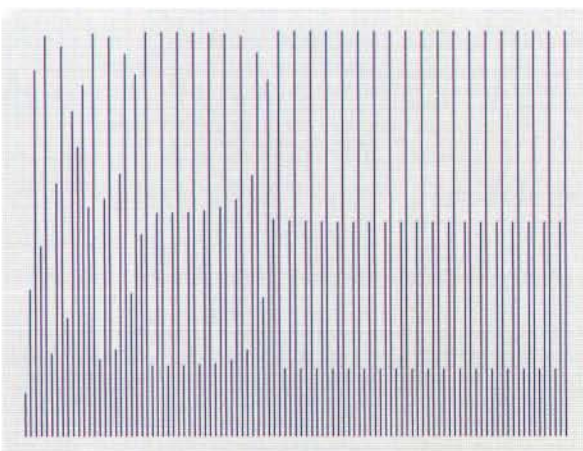
Voor een uitvoerige analyse van dit soort verschijnselen kan men de literatuur raadplegen. We volstaan met de mededeling dat Feigenbaum en anderen aan de regelmaat van de periodeverdubbeling een universele betekenis hebben gegeven met de kracht van een natuurwet. Verder hebben Mandelbrot en anderen het bifurcatiegedrag uitge-

*De ontwikkeling van vegetatie op schorren verloopt de eerste jaren via diverse populaties.*



waardige waarden zijn 75 of 150. We zien dan dat er voorbij de waarde  $a=3$  inderdaad interessante verschijnselen gaan optreden.

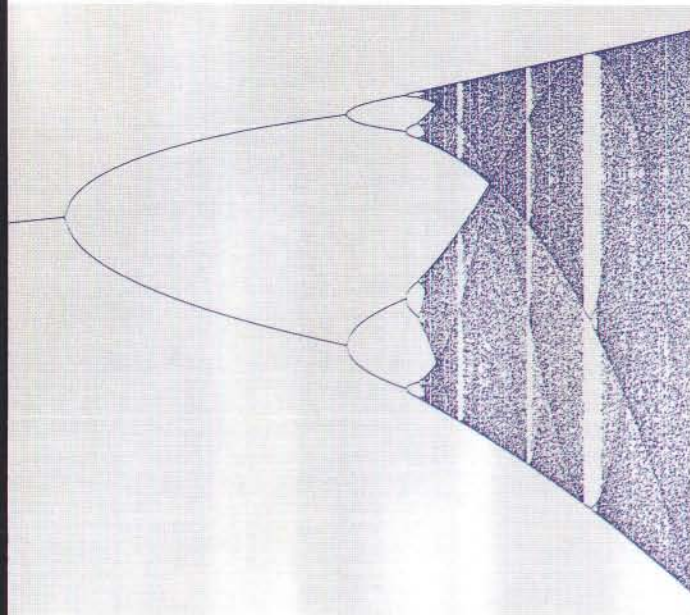
Wanneer  $a$  iets groter dan 3 is, bijvoorbeeld  $a=3,02$ , zien we dat de rij  $x_n$  om en om naar twee limietwaarden toegaat: een 2-cyclus. In de natuur vinden we zoiets terug als een afwisseling van vette en magere jaren. Bij de waarde  $a=3,449490$  treedt wederom bifurcatie op. De 2-cyclus wordt instabiel en gaat over in een stabiele 4-cyclus. Het verschijnsel herhaalt zich bij de waarde 3,544090 waarna er een stabiele 8-cyclus ontstaat. Zo gaat dat alsmaar door. De bifurcatiewaarden waarbij periodeverdubbeling optreedt, hopen zich op tot de grenswaarde 3,569946 en daarna lijkt de rij  $x_n$  zich doorgaans chaotisch te gaan gedragen. Toch zijn er wel kleine intervalletjes te vinden waarvoor er weer een stabiele cyclus optreedt. Zo vinden we in de buurt van de waarde  $a=3,83$  een stabiele 3-cyclus. Elders zijn er zogenaamde vensters met een stabiele 5-cyclus, een 7-cyclus enz. te vinden.



breid tot het complexe vlak. Mandelbrot gebruikt nagenoeg hetzelfde model maar dan met complexe waarden van  $a$ . Wij beperken ons hier echter tot een computerexperiment dat ons al heel veel kan leren over de aard van de bifurcaties in het zeer eenvoudige model van May. In het programma MAY2 ma-

*Het programma MAY1 tekent bij een juiste waarde voor  $a$  een stabiele cyclus met periode 3.*





**Het bekende bifurcatiediagram kan men op het scherm verkrijgen met het programma MAY2.**

ken we een zogenaamd bifurcatiediagram waarbij we horizontaal  $a$  uitzetten (de zogenaamde bifurcatieparameter) en verticaal de limietwaarden die horen bij een mogelijke periodieke cyclus. Voor een gegeven waarde van  $a$  voeren we de iteratie  $x \rightarrow x(1-x)$  een groot aantal malen uit, bijvoorbeeld tweehonderd keer. De startwaarde doet er niet veel toe, maar we kiezen  $x=0,5$  corresponderend met de grootste waarde van het rechterlid. We nemen aan dat na honderd stappen de limietsituatie wel ongeveer bereikt is, en die limieten - de waarden van  $x_n$  na de index 100 - zetten we verticaal uit als een rijtje punten. Dat is eigenlijk alles. Laten we  $a$  met kleine tussenstapjes van 2,9

tot 4 lopen, dan zien we hoe de limietwaarde  $1-1/a$ , voor  $2,9 < a < 3$  aangegeven door een enkele lijn, voorbij  $a=3$  zich als een vork splitst in twee takken (letterlijk een bifurcatie) waarna die takken zich ook weer vertakken, enzovoorts. Ook zien we heel duidelijk in de omgeving van 3,83 een 'window' met een stabiele 3-cyclus. Wanneer het oplossend vermogen voldoende groot is, kunnen we waarnemen hoe in dat 3-venster de drie takken elk ook weer aan een cascade van periode-verdubbeling onderworpen zijn. Om hier wat meer over te weten te komen kunnen we hetzelfde programma gebruiken. We behoeven aan het begin van het programma slechts van het gewenste bifurcatiediagram de beginwaarde en de eindwaarde van  $a$  te geven. Aldus kan een willekeurig klein detail van het diagram naar believen worden 'opgeblazen'. Het afgebeelde gehele diagram - verkregen met hetzelfde programma maar met wel een hogere precisie - kan men tegenwoordig in menige publicatie terugvinden.

Op de bovenbeschreven wijze kan men nu ook zelf heel andere iteratieve groeimodellen van het type  $a \times f(x)$  bestuderen. We nemen aan dat  $f(x)$  een dalende functie is die voor een zekere waarde van  $x$ , eventueel oneindig, nul wordt. Een eenvoudig keuze als  $1-x^2$  levert al heel wat leuks op. De lezer kan zelf uitvinden waar de bifurcaties beginnen en waar we moeten ophouden. De computer geeft het laatstgenoemde wel aan met de kreet 'overflow'. Achteraf kunnen we dan het hoe en waarom uitzoeken. Andere aardige keuzes zijn functies als bijvoorbeeld  $f(x) = 1/((1+x)^3)$ . We moeten dan wel bedacht zijn op eventuele, hoge bifurcatiewaarden van  $a$  in de orde van honderd.

```

10 REM ***BIFURCATIEDIAGRAM VAN A*X*(1-X)
20 REM ***NAAM:MAY2
30 SCREEN 9 : CLS
40 WINDOW (0,-.3)-(320,1.3)
50 PRINT"GEEF WAARDEN VOOR A TUSSEN 3 EN 4"
60 INPUT"BEGINWAARDE A1 = ",A1
70 INPUT"EINDWAARDE A2 = ",A2
80 CLS: FOR K=0 TO 280
90 IF INKEY$<>" " THEN END
100 A=A1+K*(A2-A1)/280 : X=.5
110 FOR N=1 TO 200
120 X=A*X*(1-X)
130 IF N>100 THEN PSET(K+20,X)
140 NEXT N : NEXT K : END

```


#### Aanbevolen literatuur

- Gleick J. Chaos. Amsterdam, Contact, 1989.
- Tennekes H, e.a. De vlinder van Lorenz. Amsterdam, Aramith, 1990.
- H.W. Broer en F. Verhulst. Dynamische Systemen en Chaos. Utrecht, Epsilon, 1990.
- H.G. Schuster. Deterministic Chaos. An introduction. Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft, 1988.
- C.M. van den Bleek. Over reactoren .. Kunde, kunst of chaos? Delft, Delftse Uitgevers Maatschappij, 1989.



Gaat u pas nadenken  
over een  
Donor Codicil als u  
acuut een  
nieuwe lever nodig heeft?

Veel mensen vinden 't maar een eng idee om na hun dood weefsels en organen af te staan. Totdat ze zelf met de noodzaak van een transplantatie worden geconfronteerd.

	<b>Persoonlijke gegevens:</b>
	<p>Naam: _____</p> <p>Adres: _____</p> <p>Postcode/Woonplaats: _____</p> <p>Geboortedatum: _____</p> <p><b>Te waarschuwen in geval van nood:</b></p> <p>Naam: _____</p> <p>Adres: _____</p> <p>Postcode/Woonplaats: _____</p> <p>Telefoon: _____</p> <p>Relatie: _____</p>

Een Codicil heeft immers twee kanten: u draagt 't voor iemand anders, en iemand anders draagt 't voor u.

Denk erover. Praat erover. En haal een Donor Codicil bij uw huisarts of apotheek.



Het Donor Codicil. Van levensbelang.

## Oppervlakkige behandeling

Met behulp van een laser kan men nu plaatselijk beschermende lagen aanbrengen op metalen onderdelen. Deze zo genaamde lasercoating is een thermisch proces: de laserstraal smelt in fracties van een seconde een aangebrachte laag poeder, waarna de coating metallurgisch aan het basismateriaal bindt. De eigenschappen van het coatingsmateriaal komen zelfs in dunne lagen nog tot hun recht. Deze techniek maakt het bovendien voor de ontwerper mogelijk om de coating van een onderdeel plaatselijk aan te passen, afhankelijk van de te verwachten belasting van dat deel van een onderdeel.

Alle lasbare soorten staal kunnen worden gecoat. Geschikte coa-

tingsmaterialen zijn kobaltlegeringen die bekend staan onder de naam 'Stellite' en coatings gebaseerd op gecementeerd carbide.

Het proces is met name geschikt voor onderdelen die met grote nauwkeurigheid plaatselijk moeten worden voorzien van een beschermende laag met een dikte van 0,2 tot 2 millimeter. Overigens onderzoekt men ook andere industriële toepassingen van de laser-opervlakte-technologie, zoals transformatie-harden (verharden van een oppervlak zonder vloeibare fasen en convectie van materiaal) en hersmelten (vergroten van de slijtvastheid door zuivering van een oppervlak zonder dat barsten ontstaan).

De lasercoating heeft ruime toepassingsmogelijkheden. De voor- delen liggen in de perfecte metallurgische binding die wordt verkregen ondanks de geringe versmelting van de coating met de grondlaag. Bovendien gebruikt

men kleinere hoeveelheden van de dure legeringen en is de techniek zeer betrouwbaar en daar- door geschikt voor automatisering.

*(Persbericht, Sulzer, Winterthur)*

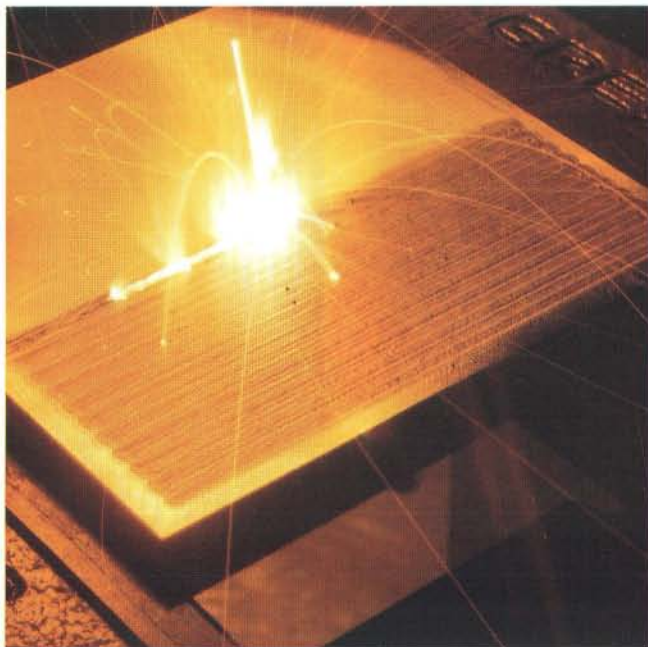
## Professor Post in de bus

Vanaf oktober corresponderen een aantal Nederlandse kinderen met Professor Post. In een pakketje dat zij van Professor Post ontvangen, bevinden zich problemen die door de kinderen moeten worden opgelost. De eerste opdracht is het samenstellen van een overlevingspakket voor een reis met een luchtballon. De tweede opdracht is nog niet bekend.

Professor Post is een initiatief van Stichting PWT, de stichting die zich beijvert voor publieksvoorlichting over wetenschap en techniek. Door middel van dit project wil deze stichting bereiken, dat kinderen op een originele wijze kennismaken met de grondbeginselen van wetenschap en techniek. Daarbij werkt zij samen met het technologiemuseum NINT en de Rijksuniversiteit Utrecht.

Professor Post is gebaseerd op het Amerikaanse project Science by Mail, dat op haar beurt is afgeleid van het Israëlische project Math by Mail. De bedoeling van deze projecten is dat kinderen plezier beleven aan het oplossen van problemen en er een idee van krijgen hoe wetenschappelijk onderzoek in zijn werk gaat. Zo willen de organisatoren kinderen stimuleren om de wereld om zich heen te ontdekken.

In het Amerikaanse project krijgen deelnemers tussen negen en dertien jaar, drie keer per jaar een probleem voorgelegd waarvoor zij een oplossing moeten bedenken. De deelnemers kunnen cor-



Hoogwaardige legeringen verkrijgen een grote slijtvastheid dank zij een

dunne laag die met een laser wordt aangebracht.

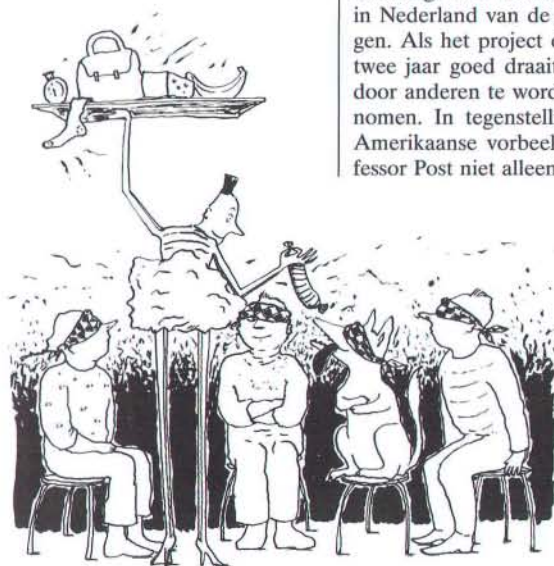


responderen over de problemen met wetenschappers. Zeg maar: hun correspondentieprofessoren. Het aardige is, dat terwijl de kinderen kennismaken met de denkwijze van een wetenschapper, laatstgenoemde verrast kan worden door zeer onconventionele en verrassende oplossingen. Zo luidde één van de opdrachten in de Verenigde Staten: "Wat zou je met het afval doen dat door de astronauten in een ruimtestation wordt geproduceerd". De binnengekomen antwoorden varieerden van het plaatsen van het afval in zakken aan de Space Shuttle zodat het afval in de dampkring verbrandt, tot het her-



moest één model dat door een van de deelnemers was gemaakt, met een bestelbusje naar het Museum of Science in Boston worden vervoerd.

Stichting PWT wil dit initiatief nu in Nederland van de grond krijgen. Als het project over een of twee jaar goed draait, dient het door anderen te worden overgenomen. In tegenstelling tot het Amerikaanse voorbeeld, zal Professor Post niet alleen natuurwe-



gebruik van het afval als mest in een ruimtestation.

Het project is in Amerika een groot succes. Begon men in het eerste jaar met tweeduizend deelnemers, in het tweede jaar deden al achtduizend enthousiaste deelnemers aan het project mee. Deze mogen schriftelijke oplossingen opsturen, maar maquettes en tekeningen zijn ook welkom. In de Verenigde Staten - waar alles bigger is, dus ook de inzendingen -

tenschappelijke problemen aanpakken, maar ook naar problemen uit de alfa- en gammawetenschappen kijken. Ondertussen hebben zich voor het Nederlandse proefproject zo'n vijfhonderd kinderen en meer dan honderd wetenschappers aangemeld. Daarmee lijkt Professor Post een veelbelovende toekomst tegemoet te gaan.

(Iota, Stichting PWT)

NATUUR & TECHNIEK verschijnt maandelijks, uitgegeven door de Centrale Uitgeverij en Adviesbureau BV te Maastricht.

Redactie en administratie zijn te bereiken op:

Voor Nederland:

Postbus 415, 6200 AK Maastricht.

Voor België:

Boechtstraat 15,  
1860-Meise/Brussel.

Bezoekadres:

Stokstraat 24, 6211 GD Maastricht.

Advertenties:

H. Beurskens.

Telefoon: 0(0-31)43 254044 (op werkdagen tot 16.30 uur).

Telefax: 0(0-31)43 216124.

Voor nieuwe abonneementen:

0(0-31)43 254044 (tot 20.30 uur, óók in het weekend).

Abonnementsprijs (12 nummers per jaar, incl. porto): f 120,- of 2350 F.

Voor drie jaar: f 285,- of 5585 F.

Prijs voor studenten: f 90,- of 1765 F.

Overige landen: + f 35,- extra porto (zeepost) of + f 45,- tot f 120,- (luchtpost).

Losse nummers: f 10,95 of 215 F (excl. verzendkosten).

Distributie voor de boekhandel:

Betapress BV, Gilze. Tel.: 01615-7800.

Abonnementen op NATUUR & TECHNIEK kunnen ingaan per 1 januari of per 1 juli (eventueel met terugwerkende kracht), doch worden dan afgesloten tot het einde van het lopende abonnementsjaar.

Zonder schriftelijke opzegging vóór het einde van elk kalenderjaar, wordt een abonnement automatisch verlengd voor de volgende jaargang. TUSSENTIJDEN kunnen geen abonnementen worden geannuleerd.

De Centrale Uitgeverij is ook uitgever van DE WETENSCHAPPELIJKE BIBLIOTHEEK.

Door een lidmaatschap te nemen betaalt u voor elk boek een serieprijs die veel lager is dan de losse prijs. Voor inlichtingen: 0(0-31)43 254044.

Postrekeningen:

Voor Nederland: nr. 1062000 t.n.v.

Natuur en Techniek te Maastricht.

Voor België: nr. 000-0157074-31

t.n.v. Natuur en Techniek te Brussel.

Bankrelaties:

Voor Nederland: AMRO-Bank NV te Heerlen, nr. 44.82.00.015.

Voor België: Kredietbank Brussel, nr. 423-907 0381-49.

# Inhoud 1990

Het trefwoordenregister 1990 krijgt u automatisch toegestuurd bij bestelling van een opbergcassette van 1990 of 1991. Een overschrijvingsformulier hiervoor kunt u eind februari 1991 verwachten, te zamen met het formulier voor uw abonnementsgeld.

## Register volgens auteursnamen

<i>Baan, J.D. van der</i> Windkracht voor de grote vaart	7-528
<i>Bakels, C.C.</i> Graan - Het oude goud	3-240
<i>Barron, E.J.</i> Ongewisse opwarming - Onvoorspelbare gevolgen van het broeikaseffect	2-94
<i>Biggelaar, J.A.M. van den en Serras, F.</i> Groeiende hokjesgeest - Compartimenten in een embryo	10-712
<i>Boekestein, A. en Henstra, S.</i> Cryo-SEM - Zicht op bevroren leven	10-696
<i>Boelhouwer, W.</i> De elektrische oertijd - Stroom en magnetisme in de 19e eeuw	7-552
<i>Borghols, W.T.A., Levinsky, H.B. en Oostendorp, D.L. van</i> Gasvlammen belicht	5-376
<i>Brinkhuizen, D.C.</i> Opgegraven eetgewoonten - Visresten verhalen het verleden	8-624
<i>Brouwer, A.</i> Istijden - Soms rilt de aarde even	12-860
<i>Brunekreef, B.</i> De norm voor een gezond milieu	6-500
<i>Cate-Stoppelenburg, A. ten, Cate, J.M. ten en Moorer, W.R.</i> Rotsen in de branding - De chemie van de mondholte	11-760
<i>Cate, J.M. ten</i> zie Cate-Stoppelenburg	
<i>Claas, F.H.J.</i> Onderdrukte afweer - Nobelprijs genees- kunde 1990	12-824
<i>Cox, T.</i> De oorsprong van de elementen	in nr. 12
<i>Dederen, L.H.T.</i> De Noordzee - Modellen voor milieu- beleid	4-288
<i>Devulder, J.E.R.</i> De pijn te lijf	11-794

<i>Dogné, A.J.H. en Oomens, A.A.M.</i> Zon op aarde - Trends in fusie- onderzoek	2-118
<i>Drost-Hansen, W. en Lin Singleton, J.</i> Levend water - (Vijf vloeibare fasen)	5-364
<i>Ducastel, R.</i> Watervlugge diertjes - Spanning tussen lucht en water	4-312
<i>Ernst, B.</i> Van literatuur tot pulp - Zuur papier ontzuurd 3-192	
<i>Feringa, B.L. en Kellogg, R.M.</i> Ontbinden in factoren - Nobelprijs scheikunde 1990	12-832
<i>Frese, W. en Gruss, P.</i> Regelgenen - Managers van de cel- differentiatie	2-106
<i>Furth, A.J.</i> De zoete aanval - Suiker in het lichaam	6-476
<i>Graveland, A.</i> Drinkwater - Bereid met beleid	6-452
<i>Groeneveld, E.R.</i> Misdaadanalyse - Het oplossend vermogen van de natuurwetenschappen	5-412
<i>Gruss, P.</i> zie Frese	
<i>Harren, F.J.M.</i> zie Voescenek	
<i>Henstra, S.</i> zie Boekestein	
<i>Hillegers, H.</i> Begrazing - Van stal gehaald voor natuurbeheer	7-572
<i>Hol, W.G.J.</i> Antistoffen als enzym	11-784
<i>Holten, J.W. van</i> Zwaartekracht of vijfde kracht - Aantrekkelijke theorieën	4-264
<i>Holten, J.W. van</i> Verrassende verstrooiing - Nobelprijs voor natuurkunde 1990	12-840
<i>Hulst, Th. van der</i> zie Reeves	
<i>Israël, F.P.</i> Neptunus en Triton - Verrassing van het zonnestelsel	1-26
<i>Jong, W.W. de</i> zie Voortier	
<i>Kellogg R.M.</i> zie Feringa	



<i>Keukeleire, D. De</i> Mout+water+hop 麥芽 bier - Chemie onder de schuimkraag	3-228	<i>Nolte, R.J.M.</i> Synzymen - Voorbeeld doet volgen	4-276
<i>Klein, W.A.</i> zie Snellen		<i>Oomens, A.A.M.</i> zie Donné	
<i>Kooij, J.G.</i> Ons aller moerstaal - Achterhaalbaar of vervlogen	1-16	<i>Oostendorp, D.L. van</i> zie Borghols	
<i>Kraan, P.C.</i> zie Snellen		<i>Oosting, R.</i> zie Reinders	
<i>Kramer, Th.</i> zie Lindhout		<i>Paepe, P.A.M.F. De</i> zie Moens	
<i>Kwak, M.M.</i> Hommels op bloembezoek - Met zuinigheid en vlijt	8-600	<i>Peperzeel, H.A. van</i> Radiotherapie - Theorie uit de praktijk	8-648
<i>Laanbroek, H.J.</i> zie Woldendorp		<i>Pepplinkhuizen, L.</i> Zenuw, ziel en ziekte - Evenwicht in de hersenen	10-684
<i>Levinsky, H.B.</i> zie Borghols		<i>Peratt, A.L.</i> Heelal zonder knal - Een eindeloze plasmazee	11-772
<i>Lin Singleton, J.</i> zie Drost-Hansen		<i>Reeves, H., Hulst en Th. van der</i> Fossielen van het uur nul - De vroege fasen van het heelal	2-142
<i>Lindhout, P. en Kramer, Th.</i> Tomaten - Van massaselectie tot manipulatie	5-352	<i>Reinders, R. en Oosting, R.</i> Waterschip en ventjager - Fossielen van de Zuiderzee	6-440
<i>Logtenberg, E.H.P.</i> Lijmen - Molekulen met een hechte band	7-564	<i>Rozendaal, S.</i> AIDS - De Jacht op een Virus	nr. 9
<i>Louwe Kooijmans, L.P.</i> Bronstijdsrijd - Slachtoffers van een oeroorlog	11-748	<i>Samyn, G.L.J.H.</i> Bromelia's - Oerwoud achter glas	6-464
<i>Masschelein, J.C.J.</i> Elektrische geleiding - Geladen transport	8-612	<i>Sattaar, O.</i> De nieuwe genetica	in nr. 11
<i>Melwig, R.</i> HDTV - Haarscherp toekomstbeeld	1-62	<i>Schilder, M.B.H.</i> zie Netto	
<i>Miedema, A.R.</i> Legeringen - Gemengde blokken	1-38	<i>Schilling, G.</i> Planeten - Bezoek aan verre burens	6-486
<i>Moens, L.J.M.G. en Paepe, P.A.M.F. De</i> Wegwijs in marmer	2-154	<i>Schuurmans, C.J.E.</i> Achter de wolken. . . - Zonnevlekken en het weer	10-724
<i>Mol, J.</i> Bloemkleurmanipulatie - Florissante technieken	7-540	<i>Serras, F.</i> zie Biggelaar	
<i>Moorer, W.R.</i> zie Cate-Stoppelenburg		<i>Smeets, F.L.M.</i> Fosfaatvrij - Vervangers op een rij	1-2
<i>Netto, W.J. en Schilder, M.B.H.</i> De aard van het beestje - Een hond in een mensenroedel	10-672	<i>Snellen, Th. C.C.M., Kraan, P.C. van der en Klein, W.A.</i> De postcode-code - Sorteren op strepen	3-216
<i>Nieland, H.M.</i> Fourieranalyse	3-178	<i>Stout, G.</i> Kruit en kneedbom - Explosiechemie	12-848
<i>Nolet, A.M.H.</i> Kruiende korst - Voorboden van een aardbeving	4-300	<i>Sutton, C.</i> Radioactiviteit	in nr. 10
<i>Nolet, B.A.</i> Zoetwaterzoogdieren	1-50	<i>Vervaeke, E.</i> Zicht op kleur - Een bonte geschiedenis	8-636
		<i>Videler, J.J.</i> Zwemmen of zinken - Voortbeweging onder water	2-130

<i>Voesenek, L.A.C.J., Harren, F.J.M. en Woltering, E.J.</i>		
H <sub>2</sub> C=CH <sub>2</sub> - Een gas als hormoon	3-204	
<i>Voorter, C.E.M. en Jong, W.W. de</i>		
De oog lens - Kristalhelder eiwit	4-322	
<i>Woldendorp, J.W. en Laanbroek, H.J.</i>		
Stikstof - Kringloop tussen hemel en aarde	5-400	
<i>Woltering, E.J.</i>		
zie Voesenek		
<i>Zeilmaker, G.H.</i>		
Kunstmatige onvruchtbaarheid - De rem op reproductie	5-388	
		Regelgenen - Managers van de cel-differentiatie 2-106
		<i>Frese, W. en Gruss, P.</i>
		Stikstof - Kringloop tussen hemel en aarde 5-400
		<i>Woldendorp, J.W. en Laanbroek, H.J.</i>
		Tomaten - Van massaselectie tot manipulatie 5-352
		<i>Lindhout, P. en Kramer, Th.</i>
		Watervlugge diertjes - Spanning tussen lucht en water 4-312
		<i>Ducastel, R.</i>
		Zoetwaterzoogdieren 1-50
		<i>Nolet, B.A.</i>
		Zwemmen of zinken - Voortbeweging onder water 2-130
		<i>Videler, J.J.</i>

## Register van artikelen

### Archeologie

Bronstijdsrijd - Slachtoffers van een oeroorlog	11-748
<i>Louwe Kooijmans, L.P.</i>	
Graan - Het oude goud	3-240
<i>Bakels, C.C.</i>	
Opgegraven eetgewoonten - Visresten verhalen het verleden	8-624
<i>Brinkhuizen, D.C.</i>	
Waterschip en ventjager - Fossielen van de Zuiderzee	6-440
<i>Reinders, R. en Oosting, R.</i>	

### Biologie

Begrazing - Van stal gehaald voor natuurbeheer	7-572
<i>Hillegers, H.</i>	
Bloemkleurmanipulatie - Florissante technieken	7-540
<i>Mol, J.</i>	
Bromelia's - Oerwoud achter glas	6-464
<i>Samyn, G.L.J.H.</i>	
De aard van het beestje - Een hond in een mensenroedel	10-672
<i>Netto, W.J. en Schilder, M.B.H.</i>	
Groeiende hokjesgeest - Compartimenten in een embryo	10-712
<i>Biggelaar, J.A.M. en Serras, F.</i>	
H <sub>2</sub> C=CH <sub>2</sub> - Een gas als hormoon	3-204
<i>Voesenek, L.A.C.J., Harren, F.J.M. en Woltering, E.J.</i>	
Hommels op bloembezoek - Met zuinigheid en vlijt	8-600
<i>Kwak, M.M.</i>	

### Geneeskunde

Aids - De Jacht op een Virus	nr. 9
<i>Rozendaal, S.</i>	
De nieuwe genetica	in nr. 11
<i>Sattaur, O.</i>	
De pijn te lijf	11-794
<i>Devulder, J.E.R.</i>	
Kunstmatige onvruchtbaarheid - De rem op reproductie	5-388
<i>Zeilmaker, G.H.</i>	
Onderdrukke afweer - Nobelprijs geneeskunde 1990	12-824
<i>Claas, F.H.J.</i>	
Radiotherapie - Theorie uit de praktijk	8-648
<i>Peperzeel, H.A. van</i>	
Zenuw, ziel en ziekte - Evenwicht in de hersenen	10-684
<i>Peplinkhuizen, L.</i>	

### Geologie

Kruiende korst - Voorboden van een aardbeving	4-300
<i>Nolet, A.M.H.</i>	
IJstijden - Soms rilt de aarde even	12-860
<i>Brouwer, A.</i>	

### Milieu

De Noordzee - Modellen voor milieubeleid	4-288
<i>Dederen, L.H.T.</i>	
De norm voor een gezond milieu	6-500
<i>Brunekreef, B.</i>	



Ongewisse opwarming - Onvoorspelbare gevolgen van het broeikas-effect  
*Barron, E.J.* 2-94

## Natuurkunde

De elektrische oertijd - Stroom en magnetisme in de 19e eeuw 7-552  
*Boelhouwer, W.*

Elektrische geleiding - Geladen transport 8-612  
*Masschelein, J.C.J.*

Verrassende verstrooiing - Nobelprijs natuurkunde 1990 12-840  
*Holten, J.W. van*

Radioactiviteit in nr. 10  
*Hutton, C.*

Zicht op kleur - Een bonte geschiedenis 8-636  
*Vervaeke, E.*

Zon op aarde - Trends in fusieonderzoek 2-118  
*Donné, A.J.H. en Oomens, A.A.M.*

Zwaartekracht of vijfde kracht - Aantrekkelijke theorieën 4-264  
*Holten, J.W. van*

## Nobelprijzen 1990

Onderdrukte afweer - Nobelprijs geneeskunde 12-824  
*Claas, F.H.J.*

Verrassende verstrooiing - Nobelprijs natuurkunde 12-840  
*Holten, J.W. van*

Ontbinden in factoren - Nobelprijs scheikunde 12-832  
*Feringa, B.L. en Kellogg, R.M.*

## Scheikunde

Antistoffen als enzym 11-784  
*Hol, W.G.J.*

De ooglen - Kristalhelder eiwit 4-322  
*Voort, C.E.M. en Jong, W.W. de*

Fosfaatvrij - Vervangers op een rij 1-2  
*Smeets, F.L.M.*

Gasvlammen belicht 5-376  
*Borghols, W.T.A., Levinsky, H.B. en Oostendorp, D.L. van*

Legeringen - Gemengde blokken 1-38  
*Miedema, A.R.*

Levend water - (Vijf vloeibare fasen) 5-364  
*Drost-Hansen, W. en Lin Singleton, J.*

Misdaadanalyse - Het oplossend vermogen van de natuurwetenschappen 5-412  
*Groeneveld, E.R.*

Mout+water+hop <sup>gist</sup> bier - Chemie onder de schuimkraag 3-228  
*Keukeleire, D. De*

Ontbinden in factoren - Nobelprijs scheikunde 1990 12-832  
*Feringa, B.L. en Kellogg, R.M.*

Rotsen in de branding - De chemie van de mondholt 11-760  
*Cate-Stoppelenburg, A. ten, Cate, J.M. ten en Moorer, W.R.*

Synzymen - Voorbeeld doet volgen 4-276  
*Nolte, R.J.M.*

Kruit en kneedbom - Explosiechemie 12-848  
*Stout, G.*

Wegwijs in marmer 2-154  
*Moens, L.J.M.G. en Paepe, P.A.M.F. De*

## Sterrenkunde

De oorsprong van de elementen in nr. 12  
*Cox, T.*

Fossielen van het uur nul - De vroege fasen van het heelal 2-142  
*Reeves, H. en Hulst, Th. van der*

Heelal zonder knal - Een eindeloze plasmazee 11-772  
*Peratt, A.L.*

Neptunus en Triton - Verrassing van het zonnestelsel 1-26  
*Israël, F.P.*

Planeten - Bezoek aan verre burens 6-486  
*Schilling, G.*

## Taalkunde

Ons aller moerstaal - Achterhaalbaar of vervlogen 1-16  
*Kooij, J.G.*

## Techniek

Cryo-SEM - Zicht op bevroren leven 10-696  
*Boekestein, A. en Henstra, S.*

De postcode-code - Sorteren op strepen 3-216  
*Snellen, Th.C.C.M., Kraan, P.C. van der en Klein, W.A.*

Drinkwater - Bereid met beleid 6-452  
*Graveland, A.*

HDTV - Haarscherp toekomstbeeld <i>Melwig, R.</i>	1-62	Het tropisch regenwoud <i>Peter de Jaeger</i>	4-341
Lijmen - Molekulen met een hechte band <i>Logtenberg, E.H.P.</i>	7-564	De industrialisatie van het onderzoek <i>Paul Wouters</i>	5-426
Van literatuur tot pulp - Zuur papier ontzuurd <i>Ernst, B.</i>	3-192	Wiens plant? <i>Joost van Kasteren</i>	5-431
Windkracht voor de grote vaart <i>Baan, J.D. van der</i>	7-528	Een venster op de wetenschap <i>Simon Rozendaal</i>	6-512
<b>Voeding</b>		Een experiment met gentherapie <i>John Zuidgeest</i>	6-516
		Een Echternachse processie <i>Simon Rozendaal</i>	7-586
De zoete aanval - Suiker in het lichaam <i>Furth, A.J.</i>	6-476	Pleidooi voor een postmoderne wetenschap <i>Peter de Jaeger</i>	8-658
<b>Weerkunde</b>		Socialisme juz nie ma, pozostal smog (Het socialisme is weg, maar de smog is gebleven) <i>Simon Rozendaal</i>	8-662
		De persoonlijkheid van een dier <i>Paul Wouters</i>	10-734
Achter de wolken . . . - Zonnevlekken en het weer <i>Schuurmans, C.J.E.</i>	10-724	Een stijfkoppige Russische bioloog <i>Simon Rozendaal</i>	10-740
<b>Wiskunde</b>		Ruzie over de technologie <i>Paul Wouters</i>	11-806
		De achterkant van het papier <i>Simon Rozendaal</i>	11-811
Fourieranalyse <i>Nieland, H.M.</i>	3-178	Alvin Weinberg: "Kernenergie komt terug" <i>Simon Rozendaal</i>	12-874
<b>Kijk op Wetenschap</b>		De opmerkelijke geschiedenis van ZOAB <i>Joost van Kasteren</i>	12-880
		<b>Simulatica</b>	
Radioactiviteit <i>Sutton, C.</i>	in nr. 10	Hemellichamen	1-86
De nieuwe genetica <i>Sattaar, O.</i>	in nr. 11	Griepgolven	2-X
De oorsprong van de elementen <i>Cox, T.</i>	in nr. 12	Zaagtand	3-260
<b>Analyse en Katalyse</b>		Milieuproblematiek	4-IV
		Priemgetallen	5-VI
De orgaanoogst <i>Simon Rozendaal</i>	1-76	Lissajousfiguren	6-IV
Virussen versus vliegende veelvraten <i>John Zuidgeest</i>	1-79	Spanningsvelden	7-IV
Sociologie als primitieve wetenschap <i>Paul Wouters</i>	1-82	Relaxatie-trillingen	8-666
Bedilzucht en dwangmatige bureaucratie <i>Paul Wouters</i>	2-168	Dikke lenzen	11-VI
"Het publiek heeft recht op kennis" <i>Joost van Kasteren</i>	3-250	Chaos in de groei	12-886
Digitale partnerkeuze <i>Peter de Jaeger</i>	3-255	<b>Hoofdartikel</b>	
Experimenteren met embryo's <i>Paul Wouters</i>	4-334	Ruimte	1-1
		(Geen) fusie	2-93
		Graan	3-177
		Kennis en belang	4-263
		Complexiteit	5-351
		Onzekerheid	6-439



Oude technieken	7-527	Razendsnel selecteren	11-817
Aanpassing	8-599	<i>Persbericht NIKHEF</i>	
Basiskennis	10-671	Microscopie met muis en monitor	11-818
Soorten wetenschap	11-747	<i>Persbericht Philips</i>	
Nobelprijzen	12-823	Antistollingslaag	11-818
		<i>Persbericht Universiteit Twente</i>	
		Merrie of hengst	11-820
		<i>Persbericht Noorder Dierenpark</i>	
		Manipulatie van maniok	11-820
		<i>Persbericht Britse Ambassade</i>	
		Oorverdovend en echo-vrij	11-821
		<i>Jacques Verduijn</i>	
		Oppervlakkige behandeling	12-890
		<i>Persbericht Sulzer</i>	
		Professor Post in de bus	12-890
		<i>Iota, Stichting PWT</i>	
<b>Actueel</b>		<b>Boekbespreking</b>	
Aminozuur-trio waakt voor zelfvertering	1-90	De Derde Planeet	4-346
<i>Nieuwsbrief AMC</i>		<i>Dirk Goossens (red.)</i>	
Aminozuur-trio II	3-259	<i>Erick Vermeulen</i>	
<i>Dr. Heleen Caro</i>		De ogen van de sfinx	6-VI
Wereldrecords met een autogiro	4-VIII	<i>Erich von Däniken</i>	
<i>Persbericht Britse Ambassade</i>		<i>Erick Vermeulen</i>	
Zeewierpap als doekje voor het bloeden	4-346	Mens in dimensie	6-VII
<i>Persbericht Britse Ambassade</i>		<i>Pelham, D.</i>	
Artemisia in de slag tegen malaria	6-522	<i>Erick Vermeulen</i>	
<i>Persbericht ACF</i>		Laat ze maar praten	7-597
Lachgas en leukemie	6-523	<i>Feynman, R.P.</i>	
<i>Persbericht Erasmus-universiteit</i>			
Linksdraaiende pillen	6-524		
<i>New Scientist</i>			
Een dochter op bestelling	7-594		
<i>Dr Peter Mombaerts</i>			
Nijmeegse biofysici ontwikkelen lerende computer	7-596		
<i>Marleen van der Ven, José Theunissen, Joost Roelse</i>			
Het Piltown-mysterie	8-668		
<i>New Scientist</i>			

## PRIJSVRAAG

### Oplossing oktober

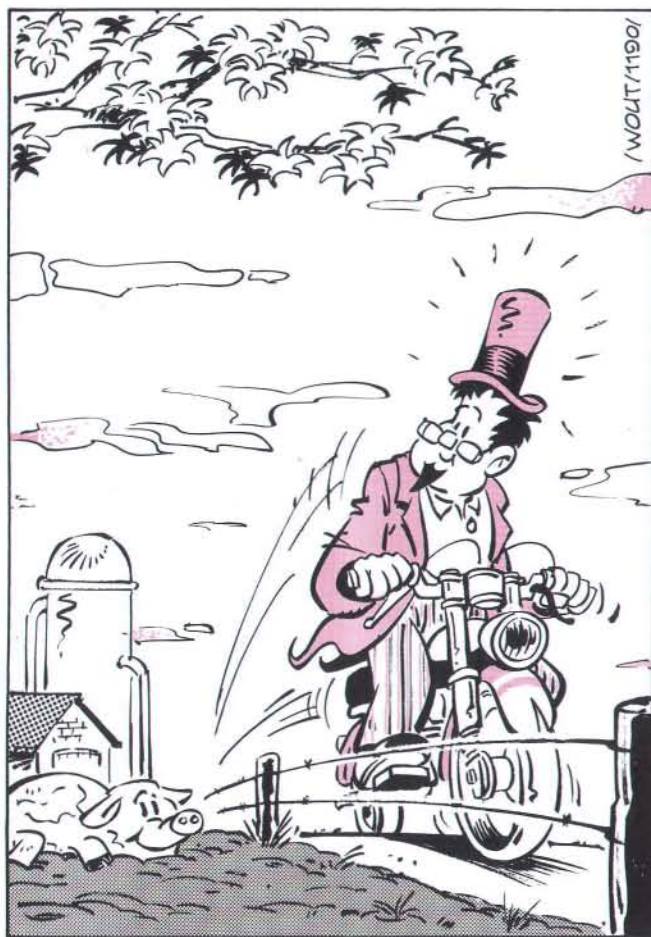
De meeste inzenders van de opgave in het oktobernummer, hebben goed ingezien dat de professor vergeefs moeite deed om de tennisbal tussen de muur en de deur uit te duwen. Voor het gemak stellen we de wrijvingscoëfficiënt van de muur en de deur aan elkaar gelijk. We stellen de normaalkracht die de tennisbal uitoefent op de deur en de muur, gelijk aan  $N$ . De wrijvingskracht tussen muur of deur en de tennisbal is dan gelijk aan  $fN$ . De hoek tussen de muur en de deur is  $2\alpha$ . De totale kracht die op de bal

wordt uitgeoefend is dan:

$$F_{\text{totaal}} = 2N \cdot \sin \alpha - 2fN \cdot \cos \alpha = 2N \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha)$$

Als  $\alpha$  maar klein genoeg wordt, wordt  $F_{\text{totaal}}$  vanzelf wel nul en zal de bal niet meer bewegen.

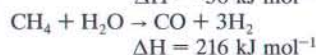
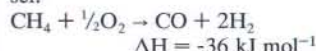
De lootprijs, een boek naar keuze uit de Wetenschappelijke Bibliotheek van Natuur & Techniek, is deze maand gewonnen door Johan Van Noten uit Putte. In de laddercompetitie bereikte J.J.M. Potters uit De Lier deze maand de bovenste trede, en wint daarmee een jaarabonnement op Natuur & Techniek.



### De nieuwe opgave

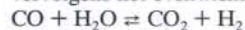
De professor las laatst een artikel over het gebruik van methanol als brandstof. Hij wil nu methanol gaan gebruiken als brandstof voor zijn motorfiets. Voor de productie van methanol wil hij methaan gebruiken dat afkomstig is uit het biogas dat wordt geleverd door een naburige varkenshouderij.

In hoofdzaak treden de volgende twee reacties op in het gasmengsel:



De professor stelt uit deze vergelijkingen een reactievergelijking op waarbij de totale enthalpieverandering nul is. Hoe luidt deze vergelijking?

De professor bedenkt zich, dat met het verkregen gasmengsel ook waterstof voor de synthese van ammoniak kan worden bereid. Stel dat hij een gasmengsel heeft van 40 mol koolstofmonoxyde, 40 mol waterstof, 18 mol koolstofdioxide en 2 mol stikstof, en dit toevoegt aan 200 mol stoom. In een reactor stelt zich vervolgens het evenwicht



in. Onder de procesomstandigheden is de evenwichtsconstante  $K$  gelijk aan 3,30. Wat is dan de samenstelling in mol van het gasmengsel dat de reactor verlaat?

Deze opgave werd beschikbaar gesteld door de Stichting Scheikunde Olympiade Nederland. Oplossingen dienen voor 4 januari 1991 te zijn ontvangen door de puzzelredactie op het adres: Natuur & Techniek  
Puzzelredactie  
Postbus 415  
6200 AK MAASTRICHT



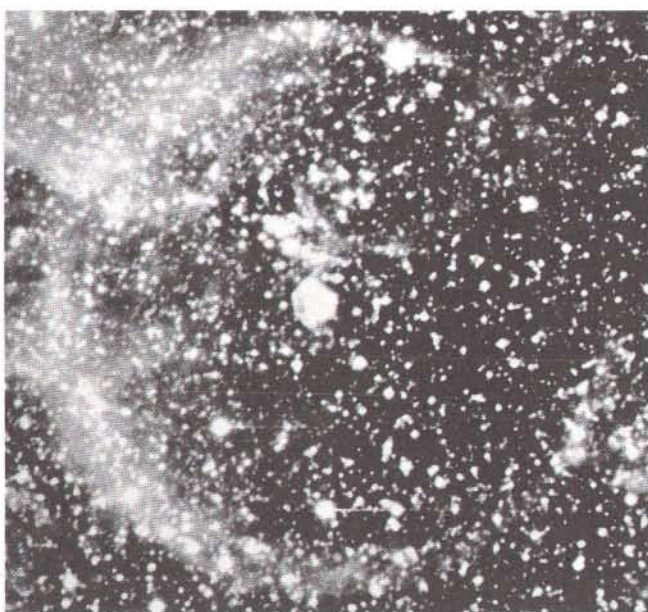
Door de oerknal ontstond een heelal met de eenvoudigste elementen, waterstof en helium. Maar de zwaardere elementen waaruit het grootste deel van de aarde en wijzelf bestaan, werden gemaakt tijdens de geboorte, het leven en de dood van enkele generaties sterren.

Tony Cox

**O**nze dagelijkse omgeving bestaat uit ongeveer negentig verschillende **chemische** elementen. De ontdekking van deze elementen was een van de grote prestaties van de scheikunde in de achttiende en negentiende eeuw. In het begin van de twintigste eeuw begon men meer te begrijpen van de bouw van de **atomen**, die kenmerkend zijn voor elk element. Negatief geladen **elektronen** leken rond de positieve kern te draaien, zoals de planeten rond de zon bewegen. De zware **atoomkern** bevat bijna alle massa van een atoom, hoewel die vergeleken met de afmeting van het hele atoom, heel klein is. Deze kern bestaat uit positief geladen **protonen** en ongeladen **neutronen**. De chemische eigenschappen van een element worden bepaald door het aantal protonen, variërend van één in waterstof tot 92 in uraan. Nog meer protonen komen er voor in elementen die van nature niet op aarde bestaan, maar die de natuurkundigen in de afgelopen tientallen jaren hebben kunnen maken.

Waar komen de chemische elementen vandaan? Chemische reacties herschikken atomen tot andere combinaties

# DE OORSPRONG VAN DE ELEMENTEN



Het felle licht van een supernova weerkaatst tegen een gaswolk die de ster eerder uitstootte (Foto: ES0).

waarbij chemische bindingen worden gemaakt of verbroken. Alleen de buitenste elektronen van een atoom nemen deel aan dit proces: de kern wordt niet beïnvloed. Zulke reacties zijn dan ook niet in staat het ene element in het andere om te zetten. Dat vereist een herschikking van de deeltjes

waaruit de kern is opgebouwd. Dit gebeurt bij **radioactief verval**, als onstabiele kernen zich splitsen waarbij soms lichtere kernen ontstaan.

De kernen van lichte atomen kunnen ook **fuseren** (samen-smelten) waardoor zwaardere atomen worden gevormd. Voor dit proces moeten de kernen

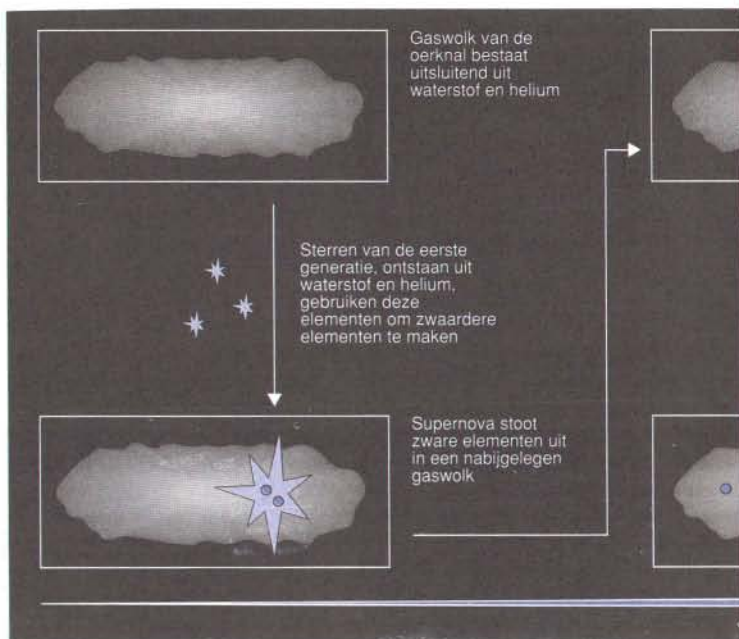
die elkaar naderen veel energie hebben om zo dicht bij elkaar te kunnen komen dat ze versmelten. Natuurkundigen voeren in versnellers zoveel energie aan deeltjes toe, dat ze dit soort kernreacties kunnen onderzoeken.

Atomen kunnen ook smelten als ze bij zeer hoge temperatuur snel en chaotisch door elkaar bewegen. Chemische reacties kosten slechts weinig energie en ze verlopen gewoonlijk sneller bij hogere temperatuur. Maar chemische reacties vinden plaats bij een temperatuur van slechts enkele tientallen, honderden of hooguit een paar duizend kelvin. Om kernen te laten reageren zijn veel hogere temperaturen nodig - minimaal tien miljoen kelvin. Zulke temperaturen kwamen voor in de allereerste stadia van het heelal, in de eerste paar minuten na de oerknal, de vuurbal waarmee het heelal vijftien miljard jaar geleden ontstond. Kernreacties treden ook op in sterren en in feite zijn zij de enig mogelijke bron voor de enorme hoeveelheid energie die de sterren miljarden jaren lang op temperatuur houdt. Dus de oerknal aan het begin van het heelal en het inwendige van sterren zijn de twee milieus waar de meeste elementen werden gemaakt.

## Elementenverdeling

### De sterren geanalyseerd

De elementen op aarde variëren enorm in de hoeveelheid waarin ze voorkomen. Zuurstof, silicium en ijzer zijn heel algemeen; veel andere elementen, zoals goud, zijn miljoen-



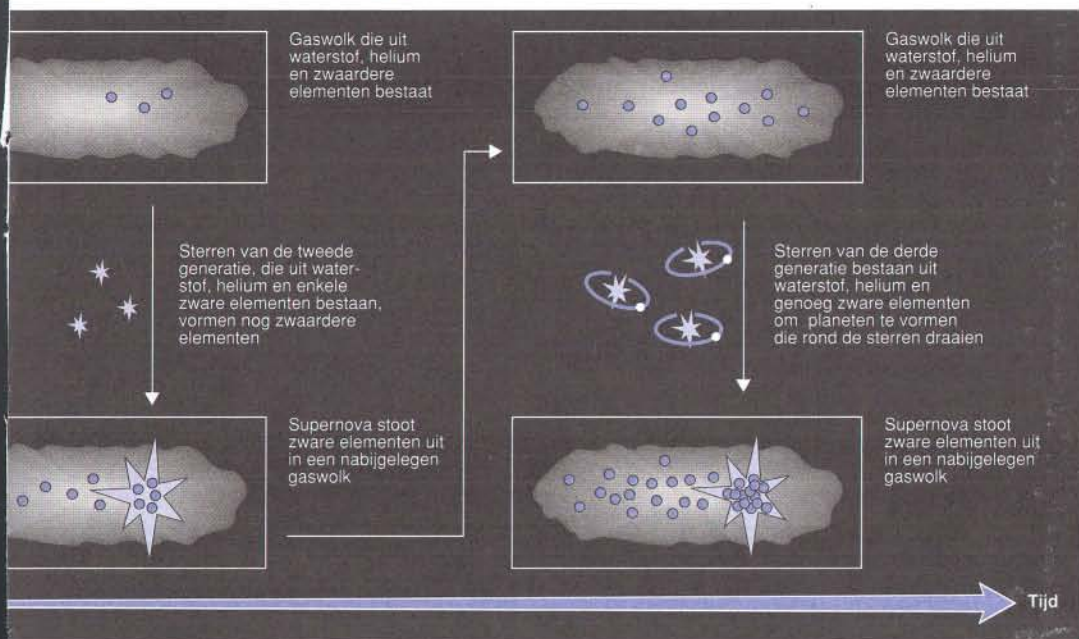
nen malen zeldzamer. De diverse elementen zijn om uiteenlopende redenen belangrijk voor ons. IJzer is het belangrijkste bestanddeel van het inwendige van de aarde. De buitenste lagen van onze planeet, inclusief de aardkorst, bestaan voornamelijk uit silicium en zuurstof met daarnaast kleinere hoeveelheden van andere elementen. Ongeveer dertig elementen zijn van groot belang voor het leven op aarde. Hiertoe behoren koolstof, zuurstof, waterstof en stikstof, maar ook enkele zeer zeldzame elementen zoals selenium. De industrie is deze eeuw bijna alle elementen gaan gebruiken. Met bijvoorbeeld de fabricage van een moderne telefoon met geheugentoetsen, zijn niet minder dan 42 elementen gemoeid.

De chemische samenstelling van de aarde is niet kenmerkend voor het heelal als geheel. We weten dat de twee lichtste

elementen, waterstof en helium, meer dan 99 procent van het zichtbare heelal uitmaken, terwijl de andere elementen in zeer kleine hoeveelheden voorkomen. Op aarde zijn waterstof en zeker helium veel zeldzamer omdat ze, behalve bij zeer lage temperatuur, gasvormig zijn; ze ontsnapten dan ook grotendeels in de ruimte toen de aarde ontstond. De elementen die veel op aarde voorkomen, stonden tot vaste stoffen - metallisch ijzer en siliciumoxyden - en concentreerden zich in de stofdeeltjes die uiteindelijk samenklonterden tot onze planeet.

Voor ons begrip van het heelal is het van belang te weten hoeveel van ieder element in de ruimte voorkomt. Niet alleen omdat dit de uiteindelijke samenstelling van de aarde beïnvloedde, maar ook omdat het aanwijzingen geeft over de oorspronkelijke vorming van de elementen. Een bevredi-





gende theorie over het ontstaan van de elementen moet zeker de hoeveelheden van elementen die we waarnemen kunnen verklaren.

Hoe zijn deze hoeveelheden bepaald? De negentiende-eeuwse filosoof Auguste Comte meende dat het onmogelijk zou zijn ooit de samenstelling van sterren en andere hemellichamen te kennen. Maar terwijl hij dat schreef beschikte men reeds over de apparatuur die daarvoor nodig was. Wanneer je het **spectrum** van zonlicht bestudeert door het licht in verschillende kleuren te splitsen met een prisma, dan neem je tussen het licht vele donkere lijnen waar. Blijkbaar komen bepaalde kleuren (of golflengten) niet in het zonlicht voor.

Scheikundigen zien bij bepaalde golflengten in spectra lichte lijnen wanneer ze in hun laboratorium elementen in een vlam brengen en kijken naar het licht dat de vlam uitzendt.

Die lijnen ontstaan doordat elementen slechts licht uitzenden bij bepaalde, buitengewoon precieze golflengten. Bij diezelfde golflengten kunnen de elementen ook licht absorberen.

De golflengten van de lijnen in het zonnespectrum verraden ons in feite welke elementen in de buitenste lagen van de zon aanwezig zijn. De daar aanwezige atomen absorberen een deel van het licht dat uit het binnenste van de zon komt. De sterkten van de lijnen in het spectrum laten ons zien hoeveel licht werd geabsorbeerd en daarmee de hoeveelheid die van elk element aanwezig is.

Astronomen hebben dit soort onderzoek gedaan aan zon, sterren en sterrenstelsels, waardoor een beeld is ontstaan van het voorkomen van elementen in de ruimte. De informatie wordt aangevuld door de analyse van **meteorieten**, in

Generaties sterren die ontploffen als supernova produceren de zware elementen (hier zichtbaar als stippen) die nodig zijn om planeten en mensen te maken.

het bijzonder die zeldzame soorten die men **koolstofachtige chondrieten** noemt. Deze buitenaardse stukken steen bestaan vermoedelijk uit materiaal dat overbleef na het ontstaan van het zonnestelsel en niet werd opgenomen door de planeten. De chemische samenstelling van deze meteorieten komt heel goed overeen met die van de zon, behalve dat ze een tekort hebben aan enkele lichte elementen, zoals bijvoorbeeld waterstof en helium, die niet tot vaste stof stolden. De zon kan waterstof en helium behouden door haar grote massa.

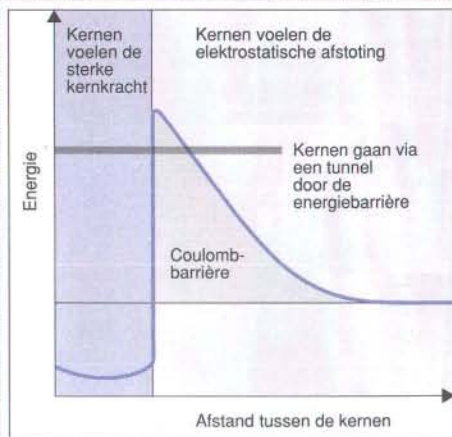
De gegevens van het zonnespectrum gecombineerd met de chemische analyse van me-

## DOOR EEN TUNNEL NAAR ZWAARDERE KERNEN

De protonen en neutronen in atoomkernen blijven bij elkaar door een aantrekkende kracht, de sterke kernkracht. Een bijzondere eigenschap van deze kracht is, dat hij uitsluitend werkt over buitengewoon kleine afstanden - omstreeks  $10^{-15}$  meter - die ongeveer overeenkomen met de afmetingen van kernen. Nog een andere belangrijke kracht speelt een rol: de elektrostatische afstoting tussen positief geladen protonen. Binnen de kern is de sterke kernkracht voldoende om deze afstoting te overwinnen en dus sterk genoeg om de stabiliteit van kernen te garanderen.

Veronderstel dat we twee kernen bij elkaar proberen te brengen om een zwaarder element te maken. Dit proces gaat heel gemakkelijk, mits we ze maar zo dicht bij elkaar brengen dat de sterke kernkracht overheerst. Maar de elektrostatische afstoting werkt over veel grotere afstanden. Voor de kernen heel dicht bij elkaar kunnen komen, is er dus een sterke afstoting werkzaam. Dit veroorzaakt een energiebarrière: de **Coulomb-barrière**. Volgens de klassieke natuurkunde zouden twee kernen voldoende energie moeten hebben om deze barrière te overwinnen alvorens de fusiereactie kan plaatsvinden. Maar de quantumfysica komt nu met een belangrijke nuancering. Volgens deze theorie kunnen onvoorstelbaar kleine deeltjes door energiebarrières gaan die volgens de klassieke natuurkunde ondoordringbaar zijn. Dit proces, het **tunneleffect**, is zeer belangrijk in vele radioactieve vervalprocessen; het is ook onontbeerlijk in de fusiereacties waarbij zware elementen ontstaan.

Het aantal deeltjes dat door de tunnel gaat is afhankelijk van de energie van de deeltjes en bij gewone temperatuur is dit aantal te verwaarlozen. Hoge temperaturen, waarbij atomen met grote snelheid kriskras door de ruimte bewegen, zijn nodig om fusiereacties mogelijk te maken. Als het tunneleffect niet bestond, zouden deze tempera-



Wanneer de kernen elkaar naderen, stoten ze elkaar af, hetgeen een gevolg is van hun positieve ladingen - de Coulomb-barrière. Doordat de kernen een tunnel kunnen 'graven' door de barrière, komen ze zo dicht bij elkaar dat ze de aantrekkende sterke kernkracht voelen. Op heel korte afstand kunnen ze fuseren en een zwaardere, stabiele kern vormen.

turen nog veel hoger moeten zijn. De productie van nieuwe elementen zou dan veel meer moeite kosten.

De grootte van de Coulomb-barrière neemt toe met de lading van de naderende kern. Om zwaardere kernen te laten fuseren zijn daarom hogere temperaturen nodig. Neutronen hebben echter geen lading en dus zijn ze in staat zonder enige afstoting kernen te naderen. Vergeliken met de gebruikelijke kernfusie zijn zware kernen dus veel gemakkelijker te maken door er neutronen aan toe te voegen.

teorieten, geven ons een redelijk nauwkeurig beeld van de samenstelling van het zonnestelsel. De waargenomen relatieve hoeveelheden (abundanties) zijn weergegeven in de grafiek op pagina 5. Let op de schaal en het enorme bereik van de verspreidingen: ieder streepje op de verticale as

scheelt een factor tien met het volgende. Op iedere honderd waterstofatomen komen ongeveer tien heliumatomen voor en minder dan één van de volgende meest voorkomende elementen, koolstof en zuurstof. En op iedere  $10^{12}$  waterstofatomen komen er minder dan tien van de zeldzame ele-

menten zoals uraan en thorium voor. De zigzaggrafiek laat zien dat elementen met een even aantal protonen in het algemeen meer voorkomen dan die met een oneven aantal. Dit duidt op de stabiliteit van kernen: een even aantal protonen of neutronen geeft extra stabiliteit.



## De eerste minuten

### Element één en twee

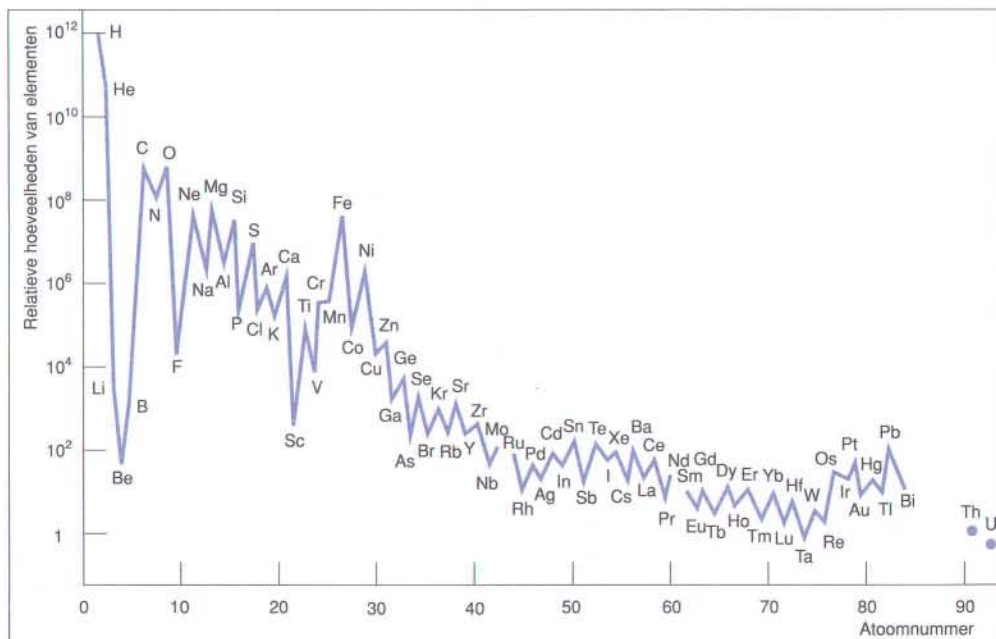
Uit het onderzoek aan andere sterren blijkt dat ons zonnestelsel een normale samenstelling heeft voor een ster van nog geen vijf miljard jaar oud. Zeer oude sterren, die hun leven zo'n tien miljard jaar geleden begonnen, bestaan uit waterstof en helium met een veel geringere hoeveelheid zware elementen. Dit suggereert dat de zware elementen nog zeldzamer waren toen deze oude sterren ontstonden. Theoretici beredeneerden dat tijdens de oerknal uitsluitend waterstof en helium ontstonden. Alle andere

elementen moeten later zijn gevormd. Tegenwoordig neemt hun hoeveelheid in het heelal nog steeds toe.

Volgens de **oerknaltheorie** begon het heelal als een 'vuurbal' van buitengewoon dichte en hete materie. Tijdens dit begin was het heelal zo heet dat er zelfs geen atoomkernen bestonden, om maar te zwijgen over de molekulen en vaste stoffen die we kennen uit ons dagelijks leven. De chemische elementen kunnen er in 'het begin' niet zijn geweest en moeten dus later zijn gemaakt. Volgens enkele van de eerste veronderstellingen over de oerknaltheorie, zouden alle bekende elementen heel snel kunnen zijn gevormd door het samenvoegen van lichte kernen tijdens de eerste fase van

het heelal. We weten nu dat dit niet kon; door de buitengewoon snelle afkoeling en uitdijning van het heelal was daar niet genoeg tijd voor. Toch vond in de eerste paar minuten wel enige elementvorming plaats. Onze huidige theorie over de samenstelling van het vroege heelal kan dit heel goed verklaren.

Een paar seconden na de oerknal was de temperatuur zo'n tien miljard kelvin. Dit is de hoogste temperatuur waarbij naast **waterstofkernen** (protonen) ook andere kernen kunnen bestaan. Protonen veranderden voortdurend in neutronen en omgekeerd. Vrije neutronen zijn niet stabiel; onder normale omstandigheden 'leven' ze gemiddeld elf minuten en daarna vervallen ze tot protonen en elektronen. Door de



De relatieve hoeveelheden van elementen in ons zonnestelsel. Elementen zijn aangegeven door hun atoomnummer en

chemisch symbool. De grafiek geeft het aantal atomen per  $10^{12}$  waterstofatomen. De verticale schaal is logaritmisch. Doordat

elementen met een even aantal protonen meer voorkomen dan die met een oneven aantal, ontstaat een zigzagkromme.

## NOG EEN MANIER OM ELEMENTEN TE MAKEN

Lithium, beryllium en boor (elementen met respectievelijk drie, vier en vijf protonen) zijn betrekkelijk zeldzaam. Hun kernen zijn niet erg stabiel en ze worden ogenblikkelijk geconsumeerd tijdens kernreacties in sterren. Vermoedelijk heeft een beetje lithium de oerknal overleefd, maar men neemt aan dat het grootste deel van deze lichte elementen op een andere manier is ontstaan, namelijk door toedoen van kosmische stralen. Deze 'stralen' zijn vooral atoomkernen die met hoge snelheid door de ruimte bewegen. Hun herkomst is nog onzeker: sommige kunnen

van supernova's afkomstig zijn of van andere hoog-energetische processen in het heelal. Hun energie is zo groot dat ze bij een botsing in staat zijn andere atoomkernen in de ruimte te verbrijzelen.

Dit proces, **kernspijting**, is vermoedelijk de oorsprong van het meeste lithium, beryllium en boor. Een bewijs hiervoor levert de atomaire samenstelling van de kosmische stralen zelf: daarin is de relatieve hoeveelheid van deze elementen veel groter dan in het gehele zonnestelsel of het heelal.

ze instabiliteit is er een verhouding van ongeveer één neutron op zeven protonen. Vóórdat een neutron vervalt, kan het zich met een proton samenvoegen tot deuterium. Deuterium noemt men ook wel zware waterstof. Bij de hoge temperaturen die toen heersten, reageerden de deuteriumkernen snel met meer protonen en het uiteindelijk produkt was de stabiele **heliumkern** die bestaat uit twee protonen en twee neutronen.

De hoeveelheid helium die ontstaat ten opzichte van de hoeveelheid waterstof, is afhankelijk van het aantal neutronen dat beschikbaar is en de temperatuur waarbij **kernreacties** kunnen beginnen. Natuurkundigen kunnen die hoeveelheid heel precies uitrekenen. De theoretische waarde - ongeveer één heliumatoom op tien waterstofatomen, ofwel 23 tot 25 massaprocenten helium - komt zeer goed overeen met de verhoudingen die in het heelal worden gevonden, vooral in de oudere sterren. Ook bleef een kleine hoeveelheid deuterium over; de voorspelde hoeveelheid ervan stemt ook goed overeen met wat de astro-

nomen hebben waargenomen. Andere **kernfusiereacties** - waarbij heliumkernen fuseren tot zwaardere kernen - konden niet in noemenswaardige mate optreden omdat de temperatuur te laag was tegen de tijd dat het helium was gevormd. Het ziet er daarom naar uit dat 99 procent van de huidige atomen van het heelal zijn bestaan dankt aan de eerste fase. De overeenstemming tussen theorie en waarneming is indrukwekkend en is een van de sterkste argumenten voor de juistheid van de oerknaltheorie: geen andere theorie over het ontstaan van het heelal kan verklaren dat waterstof en helium in de waargenomen verhouding voorkomen.

### Kosmische ketels

#### De zwaardere elementen

Hoewel elementen met een grotere massa dan helium slechts één procent van de materie in het heelal uitmaken, zijn ze voor ons om veel redenen

van wezenlijk belang. Alleen al het bestaan van vaste planeten zoals de aarde is afhankelijk van elementen zoals ijzer, silicium en zuurstof. Wijzelf bestaan uit uiterst complexe moleculen die koolstof, stikstof, zuurstof en vele andere elementen bevatten.

Een heelal dat uit waterstof en helium bestaat zou in scheikundig opzicht zeer saai zijn. Het is onmogelijk zich voor te stellen hoe daarin bijvoorbeeld levende wezens zouden kunnen ontstaan, laat staan intelligente wezens als de mens, die het heelal kunnen waarnemen en beschrijven. Om zwaardere elementen te maken zijn hoge temperaturen nodig gedurende een veel langere periode dan mogelijk was na de oerknal. Zulke omstandigheden bestaan tegenwoordig in de centra van sterren. Daar zijn dan ook de meeste andere elementen gemaakt.

Een ster ontstaat als een grote massa gas samentrekt onder invloed van zijn eigen **zwaartekracht**. Samenpersing verhoogt de temperatuur in het centrum tot het punt waarbij kernen beginnen te fuseren en zwaardere kernen ontstaan. De



energie-opbrengst van de kernfusie houdt de ster op temperatuur en voorkomt verdere inkrimping, ten minste tot de 'kernbrandstof' is opgebruikt. De eerste reactie, bij een temperatuur van ongeveer tien miljoen kelvin, is de fusie van waterstofkernen (protonen) tot helium. Dit noemt men de **waterstofverbrandingsfase** van sterren. Deze reactie vindt in een aantal stappen plaats. In sommige ervan wordt de helft van de protonen omgezet in neutronen. De waterstofverbrandingsfase is geen verbranding in de gebruikelijke betekenis. Waterstof verbranden levert geen nieuwe elementen buiten helium, maar het is belangrijk omdat de vrijkomende energie de sterren gedurende een groot deel van hun leven laat schijnen.

Door de waterstofverbrandingsfase ontstaat een bol van helium in het centrum van de ster. Als de waterstof in de kern op raakt en de energieopbrengst van de reactie daalt, trekt het centrum van de ster opnieuw samen en wordt nog heter. Terwijl het centrale deel krimpt, dijen de buitenste delen van de ster uit: de ster groeit uit tot een **rode reus**.

Wat daarna gebeurt hangt af van de massa van de ster. Bij sterren die een betrekkelijk kleine massa hebben, wordt de bol helium een compact object dat niet veel groter is dan de aarde en waarin de heliumkernen dicht opeen zijn gepakt. We noemen het een **witte dwerg**. De buitenste lagen ontsnappen in de ruimte.

Wanneer de ster een grotere massa heeft dan 0,4 maal de massa van de zon, wordt het centrale deel zo heet (rond honderd miljoen kelvin) dat de heliumkernen kunnen fuseren en zwaardere kernen vormen.

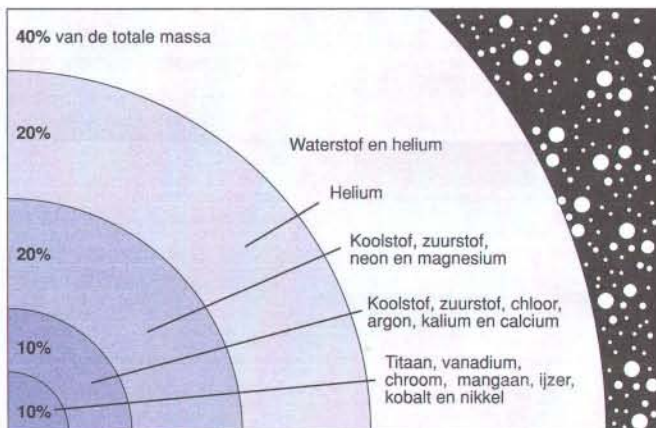
Deze fusiereacties vereisen hogere temperaturen omdat de kernen een grotere lading hebben en dus meer energie nodig hebben om hun onderlinge elektrische afstoting te overwinnen.

Twee heliumkernen vormen **beryllium** (met vier protonen). Deze kern is nogal instabiel en reageert dan ook prompt met andere heliumkernen, waarbij eerst **koolstof** en vervolgens **zuurstof** ontstaat. Deze twee elementen komen, na waterstof en helium, het meest voor in het heelal.

De relatieve hoeveelheden van de elementen die worden gemaakt zijn afhankelijk van de temperatuur van de ster, die op zijn beurt afhangt van zijn massa. Maar de astronomen weten ook dat enkele subtiele kernfysische aspecten een rol spelen. Eigenlijk is het toevallig dat koolstof niet meteen reageert, waardoor het zou verdwijnen. Een wereld zonder koolstof zou er één zijn zonder ons!

Terwijl het helium wordt opgebruikt, ontstaat middenin de ster een massieve bol van koolstof en zuurstof. Voor een ster met een massa tussen 0,4 en 8 maal de massa van de zon is dit het einde van de fusiereacties. Het centrale deel wordt een witte dwerg die geen zwaardere elementen bevat.

In de zwaarste sterren wordt het centrale deel zo enorm heet dat koolstof en zuurstof op hun beurt fuseren waarbij elementen ontstaan die ongeveer zo zwaar zijn als **zwavel**. Helemaal in het centrum vinden stapsgewijs verdere reacties plaats waarbij uiteindelijk **ijzer** ontstaat (dat 26 protonen heeft) en een aantal elementen met vergelijkbare massa. Dan stoppen de reacties, want ijzer heeft de meest stabiele kern van alle elementen en kan onder deze omstandigheden niet fuseren. Rondom het ijzeren centrum van de ster bevinden zich diverse lagen waar de andere reacties nog doorgaan. Behalve



Vlak voordat een zware ster explodeert als supernova, beschikt zij over een schillenstructuur. In iedere schil zijn de belangrijkste elementen vermeld die daar voorkomen. Het diagram geeft een

aanwijzing over de relatieve massa van elk deel, maar niet over de afmeting. De binnenste schillen hebben een veel grotere dichtheid en nemen veel minder ruimte in dan de figuur suggereert.



de reacties die waterstof tot ijzer opbouwen, vinden in deze lagen nog andere fusiereacties plaats. Deze minder belangrijke reacties kunnen elementen maken die zwaarder zijn dan ijzer, in wat astronomen het **s-proces** noemen. De s staat voor 'slow' (langzaam). Dit s-proces vindt plaats als enkele reacties neutronen leveren die door andere kernen worden ingevangen, waarbij de massa van deze kernen toeneemt. Als een neutron eenmaal is ingevangen kan het veranderen in een proton. Op deze manier kan het s-proces zowel het aantal protonen als neutronen in een kern vergroten. Het kan elementen maken tot aan **bismut**, dat 83 protonen heeft.

## Dood van een ster

### Elementen van een supernova

Het leven van een ster bereikt zijn laatste stadium als in het centrum ijzer ontstaat. De ijzerkernen kunnen geen energie leveren door te fuseren, maar de zwaartekracht is meedogenloos: die perst het centrale deel verder samen, waardoor de temperatuur stijgt tot enkele miljarden kelvin. Enkele elementen die in het centrale deel zijn gemaakt beginnen in dit inferno uiteen te vallen en het alerbinnenste deel van de ster stort plotseling ineen tot een dichte massa vaste neutronen. De buitenste lagen vallen naar binnen, kaatsen terug en brengen de inhoud van de ster uit in de ruimte tijdens een **supernova-explosie**. De explosie zelf creëert diverse andere zware elementen doordat een vloed van neutronen ontstaat die

door de aanwezige kernen wordt geabsorbeerd. Anders dan bij het s-proces, waar neutronen een voor een bij een kern worden gevoegd, zijn er nu zoveel neutronen dat ze zich met meerdere tegelijkertijd aan de kernen hechten. Bij dit **r-proces** (r staat voor 'rapid', snel) kunnen elementen ontstaan die ongeveer zo zwaar zijn als **uraan**.

Tijdens een supernova-explosie neemt de helderheid van de ster enorm toe en soms schijnt ze zo helder als een miljard zonnen. De afgelopen vijftig jaar hebben de astronomen honderden supernova's gevonden in verre sterrenstelsels. Die stonden zo ver weg dat ze een telescoop nodig hadden om ze te zien. Als een supernova ontstaat in ons Melkwegstelsel of in een dichtbij gelegen stelsel, is hij soms zo helder dat we hem met een ongewapend oog kunnen zien. In verslagen uit het verleden treffen we verscheidene supernova's aan, waaronder een waarneming in 1054 door Chinese astronomen. Het overblijfsel van deze supernova is de **Krabnevel**, een wolk heet gas die nog steeds uitdijt vanuit het punt van de explosie. Het spectrum van het uitzettende gas wijst op de aanwezigheid van verscheidene elementen die binnenin de ster zijn gemaakt. De recentste supernova die met het blote oog zichtbaar was, werd in 1987 waargenomen. Het spectrum van zijn gasresten toont vele elementen die tijdens de explosie ontstonden, waaronder een paar die radioactief zijn en die sinds de uit-

barsting geleidelijk aan verdwijnen.

Supernova's leveren het belangrijkste scenario om elementen in de ruimte te brengen. Producten van supernova's verspreiden zich en mengen zich met meer gas. Dan gaan ze deel uitmaken van latere generaties sterren die zich in het gas vormen, waarbij tenslotte **planeten** ontstaan.

Naast de directe waarnemingen van de resten van supernova's, is de goede overeenkomst tussen berekende en waargenomen verspreiding van elementen het beste bewijs dat de theorie over het ontstaan van elementen in sterren juist is. Zulke berekeningen zijn moeilijk en vereisen supercomputers. Ze laten zien dat bijna alle materie in het zonnestelsel, behalve de waterstof en het helium dat overbleef na de oerknal, werd gemaakt door supernova's in de eerste paar miljard jaar van ons melkwegstelsel.

#### Literatuur

Weinberg S. De eerste drie minuten - Nieuwe inzichten over het ontstaan van het heelal. Maastricht/Brussel: Natuur & Techniek, 1983.

Reeves H, Van der Hulst T. Fossielen van het uur nul - de vroege fasen van het heelal. Natuur & Techniek 1990; 58: 6, 142-153.

Van Helden R. Mensen zoals wij - hun speurtocht naar het begin van het heelal. Amsterdam: Uitgeverij Annex, 1990.

Dit artikel is voor **Natuur & Techniek** vertaald en bewerkt door Dr R. van Helden van de Hogeschool Midden Nederland, Faculteit Educatieve Opleidingen in Utrecht.

KIJK OP WETENSCHAP verschijnt zes maal per jaar, onder redactie van Natuur & Techniek, in samenwerking met New Scientist. Van dit katern zijn overdrukken beschikbaar voor f 2,50 of 50 F per exemplaar (excl. verzendkosten), te bestellen bij Natuur & Techniek, Postbus 415, 6200 AK Maastricht (Nederland); telefoon 0(0-31)43 254044. Voor het maken van kopieën is toestemming vereist van de Stichting Reprorecht (Postbus 882, 1180 AW Amstelveen, Nederland).



# VOLGENDE MAAND IN NATUUR EN TECHNIEK

## Ziekenhuislab

Dr P.M.W. Janssens en  
dr J.L. Willems

Steeds beter begrijpen artsen de onderliggende oorzaken van ziekten. De scheikunde helpt hen bij het vroegtijdig opsporen en het vaststellen van ziekten, maar ook bij het volgen van een ziektebeeld. Een medische specialist heeft daarom behoefte aan een grote verscheidenheid bepalingen uit het ziekenhuislab. De klinische chemie levert ze.



## Oppervlakken

Prof dr F. Meijer

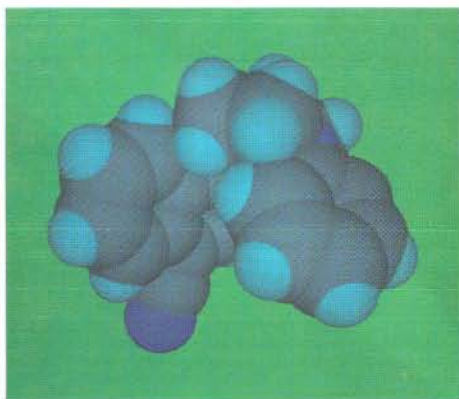
Dertig jaar oppervlakte-onderzoek laat een enorme wetenschappelijke ontwikkeling zien. Deze resultaten leiden tot nieuwe

technieken, die nu worden toegepast in halfgeleider-lasers en transistoren. Het eind van de ontwikkelingen is nog lang niet in zicht, dankzij de wisselwerking tussen wetenschap en techniek.

## Hersenhelften

Dr W. Heller

Hoe kunnen patiënten zonder verbinding tussen hun hersenhelften vrijwel normaal lijken? De samenwerking tussen beide helften is dan immers onmogelijk. Langzaam leren we de taken van de hersenhelften kennen en kunnen we ons gaan afvragen hoe twee helften één verstandig geheel vormen.



## Riolering

Prof ir J.B.M. Wiggers

Grote stukken riool moeten de komende decennia worden vervangen, terwijl de verontreiniging van het oppervlaktewater door de riolering misschien wel helemaal moet worden teruggedrongen. Voor technici is het een uitdaging om die twee vliegen in één klap te slaan; voor de rioolbeheerders wordt het een zware financiële last.

## Organochip?

Prof dr J.W. Verhoeven

Alhoewel er steeds meer schakelingen op een klein plakje silicium passen, is er een grens aan de verkleining op een siliciumrooster. In de organische chemie kan men inmiddels vrijwel elk gewenst molecuul realiseren. Als die molekulen kunnen werken als elektronische schakelingen, opent dat de weg naar een moleculaire chip.

## KIJK OP WETENSCHAP

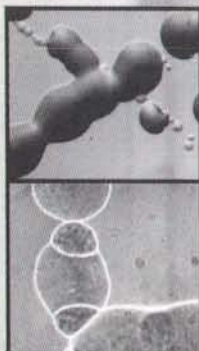
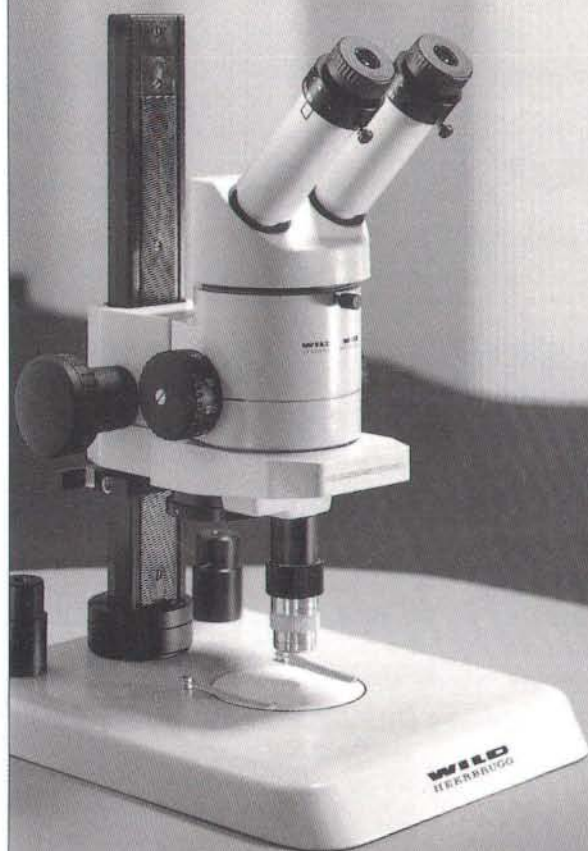
### De schillen van de aarde



De laatste eeuw hebben geologen het binnenste van onze planeet grondig onderzocht en aangetoond dat zij is opgebouwd uit een aantal schillen. Toen ze probeerden een beeld van het inwendige te krijgen, ontdekten ze dat de buitenste schil voortdurend in beweging is.

**WILD Kombistereo**

**Een Multifunktionele Mikroskoop**



De WILD Kombistereo biedt u de unieke combinatie van een stereomikroskoop met een objectief voor mikroskopisch detailonderzoek.

Met één handbeweging wisselt u tussen 3-dimensionale beoordeling of detailanalyse.

Resolutie en beeldkwaliteit van een standaard mikroskoopobjectief bij maximale vergroting (ca. 600x).

De WILD Kombistereo is naar keuze leverbaar met een vergrotingswisselaar of zoom 1:6

*Neemt u voor vrijblijvende nadere informatie en/of demonstratie even contact op met onze afdeling Mikro.*

LEICA B.V.  
Afdeling Mikro  
Postbus 80, 2280 AB Rijswijk  
Verrijn Stuaartlaan 7, 2288 EK Rijswijk  
Tel: 070 - 3 198 999 Fax: 070 - 3 905 659

*Leica*